Hommage de l'auteur

REMOVED

SULLA

VELOCITÀ DEL SUONO NEI LIQUIDI

Nuove ricerche sperimentali

DEL

PROF. TITO MARTINI

SOCIO CORR. DEL R. ISTITUTO VENETO DI SCIENZE,
LETTERE ED ARTI

(Memoria premiata dalla R. Accademia dei Lincei)

VENEZIA
TIPOGRAFIA DI G. ANTONELLI
1886

(*Estr. dall' Appendice degli Atti del R. Istituto veneto di scienze, lettere ed arti, Tom. IV, Ser. VI.*)

534.2
M36vl

SULLA

VELOCITÀ DEL SUONO NEI LIQUIDI.

Nuove ricerche sperimentali

DEL S. C. TITO MARTINI (1)

PARTE I.

Propagazione teorica del suono nei mezzi elastici. — Rapido cenno sulle esperienze fatte dai fisici per determinare la velocità del suono negli aeriformi. — Descrizione dei metodi diretti e indiretti per misurare la velocità del suono nei liquidi.

Se si considera un cilindro di lunghezza indefinita, la cui sostanza, solida liquida o gassosa, sia omogenea ed elastica, si dimostra che la velocità colla quale si trasmettono nella detta massa i movimenti oscillatorii è espressa dalla formola

$$V = \sqrt{\frac{E}{\delta}}\ ; \qquad (1)$$

dove δ rappresenta la densità della sostanza ed E un coefficiente che *dipende* dalle proprietà elastiche della sostanza di cui è formato il cilindro.

Se il mezzo è di tal natura che vi si possano trascurare le variazioni di temperatura che accompagnano i cambia-

(1) Memoria premiata dalla R. Accademia dei Lincei.

55254

menti di volume, come appunto avviene nei corpi solidi e liquidi, allora chiamando e il coefficiente di elasticità, cioè la tensione che bisognerebbe applicare alle basi del cilindro di sezione 1 per allungarlo di una quantità eguale alla sua lunghezza primitiva, risulta $E = e$, e la formola (1) diviene

$$V = \sqrt{\frac{e}{\delta}} \; ; \qquad (2).$$

La formola (2) è quella trovata da Newton che la dimostrò in due proposizioni dei suoi *principii* (1).

La formola di Newton vale per la propagazione del suono in un cilindro solido o liquido di lunghezza indefinita, ma non vale per una massa solida indefinita in tutti i versi, e, secondo Wertheim, neppure in una massa liquida, purchè indefinita per ogni verso; ma su ciò ritorneremo più lungi.

Laplace pose la formola di Newton sotto una forma diversa. Sia l la quantità di cui si raccorcia un cilindro di una data sostanza e di lunghezza 1, quando è compresso alle due basi da una forza eguale al suo peso; sia d la densità. Chiamando φ la forza elastica eccitata dalla compressione, questa si misura facendo il prodotto della massa scossa per il cammino fatto in un secondo. La massa è qui rappresentata dall' accrescimento di densità di tutti gli strati percorsi della compressione; siffatto accrescimento è uguale a $\frac{ld}{P}$ per l' unità di carica, e per la carica φ è

$$\frac{ld\varphi}{P},$$

dove P rappresenta il peso della colonna di lunghezza e di sezione eguale all' unità. Si ha dunque

(1) *Phylosophiae naturalis principia mathematica*, libro III, proposiz. 47 e 49.

$$\varphi = \frac{ld\varphi}{P} v \times v \ ,$$

d' onde

$$v^2 = \frac{P}{ld} \ ,$$

$$v = \sqrt{\frac{g}{l}} \qquad (3)$$

sostituendo a P il suo valore gd.

La formola di Laplace può scriversi ancora in altro modo sostituendo per l il suo valore. Sia c la compressibilità del cilindro sotto lo sforzo di una atmosfera, misurata da una colonna di mercurio di $0^m,76$. La colonna x della sostanza considerata, capace di produrre la stessa compressione, avrebbe una lunghezza che si ricava dalla proporzione

$$d : \Delta = 0,76 : x \ ,$$

dove Δ è la densità del mercurio; si ha dunque

$$x = \frac{0,76\Delta}{d} \ .$$

Perciò una colonna lunga 1^m produrrebbe la compressione $\frac{c}{x}$, quindi

$$l = \frac{c}{x} = \frac{cd}{0,76\Delta} \ ,$$

laonde sostituendo il valore di l nella formola (3) si ha

$$v = \sqrt{\frac{0,76\Delta g}{cd}} \qquad (4).$$

Questa formola vale solo per i corpi solidi e liquidi dove è trascurabile la variazione di temperatura operata dalla compressione. Ma nel caso di un cilindro gassoso, il calore sviluppato dalla compressione o assorbito dalla dila-

tazione non può trascurarsi; e poichè le vibrazioni sonore sono troppo rapide perchè l'equilibrio di temperatura possa prodursi ad ogni istante fra la colonna del gas vibrante e le pareti del tubo che lo racchiude, il valore di E non può essere confuso col coefficiente di compressibilità. Ecco in qual modo può trovarsi la velocità di propagazione del suono in una colonna gassosa, supposto che il gas sia perfetto, cioè definito dalla relazione

$$\frac{pv}{T} = \text{costante},$$

e supposto che non v'abbia scambio di calore fra la massa gassosa e le pareti del vaso che la racchiude.

Sia e l'elasticità del gas, nel quale si produce uno scotimento mercè un eccesso di pressione ε che dura un tempo θ, agendo sull'unità di massa. Se si designa con m la massa compressa, la forza d'impulso sarà $m\varepsilon\theta$. Rappresentando con x la velocità di propagazione dello scotimento, la massa scossa nel tempo θ sarà $mx\theta\delta$, dove δ è l'eccesso della densità attuale dello strato stesso, sulla densità che esso possedeva prima della compressione: la quantità di movimento acquistata da questa massa sarà

$$mx\theta\delta . x = mx^2\theta\delta \ .$$

Si avrà dunque l'equazione seguente fra la forza d'impulso e la quantità di moto

$$m\varepsilon\theta = mx^2\theta\delta \ ,$$

da cui

$$x = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\delta}} \qquad (a).$$

Sia D la densità del gas sotto la pressione e ed alla temperatura T, e D_0 la sua densità alla temperatura 0^0 e sotto la pressione normale e_0; si avrà la relazione

$$e = \frac{e_0 D}{D_0}(1 + \alpha T) \ , \qquad (b)$$

dove α rappresenta il coefficiente di dilatazione degli aeriformi. Se indichiamo con c e c_1 i calori specifici del gas a pressione costante e a volume costante, si sa che l'unità di volume che si dilata passando da T^0 a $(T+1)^0$, aumenta di $\frac{\alpha}{1+\alpha T}$, e assorbe una quantità di calore $\frac{c}{c_1} - 1 = K - 1$. Da ciò risulta che comprimendo l'unità di volume del gas, preso a T^0, di $\frac{\alpha}{1+\alpha T}$, la sua temperatura s' innalzerà di $(K-1)^0$. Ma $\frac{\delta}{D}$ rappresenta sensibilmente la variazione dell' unità di volume corrispondente ad un accrescimento di pressione ε; designando con t l' accrescimento di temperatura che seguirà questa compressione, si avrà

$$\frac{\alpha}{1+\alpha T} : K - 1 = \frac{\delta}{D} : t \qquad (c).$$

Ma poichè e crescendo di ε, T aumenta di t, e D di δ, si avrà dall' equazione (b)

$$e + \varepsilon = \frac{e_0}{D_0}(D + \delta)\{1 + \alpha(T + t)\} \ ,$$

ove, mettendo per e il suo valore dato dalla (b), si ha

$$\varepsilon = \frac{e_0}{D_0} D \alpha t + \frac{e_0}{D_0} \delta \{1 + \alpha(T + t)\} \qquad (d).$$

Dalle equazioni (b) e (c) si deduce,

$$\frac{e_0}{D_0} = \frac{c}{D(1+\alpha T)} \ ,$$

$$\frac{\alpha t}{1+\alpha T} = \frac{\delta(K-1)}{D} \ ,$$

valori che sostituiti nell' equazione (d), danno

$$\varepsilon = e \left\{ \frac{\delta}{D} K + \frac{\delta^2}{D^2} (H - 1) \right\} \qquad (e).$$

Trascurando l' infinitesimo del secondo ordine $\frac{\delta^2}{D^2}$ in confronto di $\frac{\delta}{D}$, ovvero sia passando al limite di ε per dare la continuità al fenomeno, si ottiene

$$\varepsilon = \frac{e\delta}{D} K ,$$

quindi

$$x = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\delta}} \text{ diviene } \sqrt{\frac{e}{D} K} \qquad (5).$$

La formula (5) vale per calcolare la velocità a 0^0; per una temperatura t si avrà

$$v = \sqrt{\frac{e}{D} K(1 + \alpha t)} ,$$

ovvero

$$v = \sqrt{\frac{g\Delta \times 0{,}76}{D} K(1 + \alpha t)} \qquad (6).$$

I fisici hanno fatto molte prove per misurare con modi sì diretti che indiretti la velocità del suono nei varii mezzi. Siffatte ricerche sono di grande importanza, perchè, rispetto ai solidi ed ai liquidi, permettono di studiare la loro elasticità, e rispetto agli aeriformi hanno dato il modo di trovare con molta esattezza il rapporto $\frac{c}{c_1}$. I primi studii sulla velocità del suono nell' aria furono iniziati dal Viviani [1] e

(1) *Lettera di Vincenzo Viviani* inserita nei *Saggi di naturali esperienze*, pag. 49. Firenze, tipografia galileiana.

continuati dagli Accademici del Cimento ([1]). Roberto Boyle Walker, Gian Domenico Cassini, Huyghens, Roemer, Flamsteed e Derham aggiunsero nuove ricerche

L' Accademia di Francia ordinò novelle prove, negli anni 1738 e 1739, le quali furono eseguite da La Caille, Cassini di Thury, Maraldi ed altri accademici ([2]). Queste date segnano le prime misure di precisione in ordine a siffatto argomento. Gian Lodovico Bianconi fece pure a Bologna delle interessanti sperienze, e primo dimostrò la influenza della temperatura sulla celerità del suono ([3]).

I membri del *Bureau des longitudes*, per invito del Laplace, iniziarono nel 1822 delle nuove ricerche fra le colline di Montlhery e Villejuif per verificare la formola di Biot e Poisson (form.ª 6.ª), che abbiamo precedentemente dimostrata ([4]). Poco dopo Wood e Van Bech fecero delle nuove osservazioni nelle vicinanze di Utrecht, e trovarono dei risultamenti analoghi con quelli ottenuti dai membri del *Bureau des longitudes*. Franklin, Parry e Forster fecero pure delle osservazioni nelle regioni artiche ed a temperature bassissime, taluna delle quali giunse fino a 38°,5 sotto lo zero. Ma il coronamento delle sperienze dirette per determinare la velocità del suono nell' aria, fu compiuto da Regnault ([5]), il quale eseguì una lunga serie di ricerche tanto nei tubi di condotta di vario diametro, quanto nell' aria libera. Regnault studiò con somma cura tutte le cause che possono turbare il fenomeno, e segnatamente

(1) *Saggi di naturali esperienze* fatte dagli accademici del Cimento, p. 156 e seguenti.

(2) *Mémoires de l' Académie des sciences*, anno 1738, p. 121, e anno 1739, p. 126.

(3) *Della diversa velocità del suono*, lettera di Gian Lodovico Bianconi al march. Maffei. Venezia, appresso Simeone Occhi, 1746,

(4) *Annales de Chimie et de Physique*, 2.me serie, t. 20, p. 210.

(5) *Mémoires de l' Académie des sciences*, 1868, t. 37.

l'influenza che sulla velocità del suono può avere l'intensità dell'onda.

Rispetto ai metodi indiretti per valutare la velocità del suono negli altri gas, dopo alcuni tentativi fatti dal Chladni e Jacquin (1), da Kerby e Merrik (2), da Benzemberg (3) e da Riccardo Van Rees (4), abbiamo il primo lavoro di precisione eseguito dal Dulong che ideò un metodo mercè il quale misurava la lunghezza dell'onda ottenuta in un tubo fatto parlare con uno o con altro gas (5). Wertheim fece pure delle ricerche sullo stesso argomento vôlte principalmente a correggere le perturbazioni che hanno luogo nel tubo e che modificano la lunghezza dell'onda (6). Una serie di ricerche assai più estesa di quella fatta dal Dulong venne eseguita dal Masson (7), e Regnault sperimentò la velocità del suono in alcuni gas chiusi in lunghi tubi di condotta (8). Kundt immaginò un elegante metodo, per trovare la velocità del suono nei gas, misurando la lunghezza dell'onda mediante l'accumularsi di una polvere leggiera, chiusa nel tubo, nei punti corrispondenti ai nodi (9). Chi scrive ha pur fatto delle ricerche sopra siffatto argomento, e mediante un metodo suggeritogli da una esperienza del Tyndall (10) ha determinato la velocità del suono in alcuni gas

(1) Chladni, *Traité d'Acoustique*. Paris, 1809, pp. 87 e 274.

(2) *Nicholson's Journal*, t. 27, p. 269 e t. 33, p. 161.

(3) *Annalen der Physik* von Gilbert; neue Folge, t. 12, p. 12.

(4) *Dissertatio physico-mathematica inauguralis de celeritate soni per fluida elastica propagati.* — « Bibliothèque universelle », t. 15, p. 62.

(5) *Annales de Chimie et de Physique*, 2.me série, t. 41, p. 213.

(6) Idem, 3.me série, t. 23, p. 444.

(7) Idem, 3.me série, t. 127, p. 497.

(8) *Mémoires de l'Académie des sciences*, anno 1868, t. 37.

(9) *Poggendorf's Annalen*, t. 127, p. 497.

(10) *Le Son*. Paris, 1869, p. 185.

più pesanti dell' aria, con risultamenti identici a quelli del Dulong e del Regnault, ed ha determinato per la prima volta la velocità del suono nel cloro (1). Finalmente lo Strecker, usando il metodo di Kundt, misurò la velocità del suono nel cloro e nei vapori di bromo e di iodio; rispetto al cloro trovò un risultamento identico col mio (2).

Non è mio intendimento il descrivere in questa memoria i varii metodi che sono stati usati per misurare la velocità del suono nei gas; mi sono limitato a citare la lunga serie di memorie per mostrare quanta importanza hanno dato i fisici a siffatte ricerche. In questo scritto intendo parlare della velocità del suono nei liquidi, e descrivendo dapprima le varie prove eseguite per risolvere il difficile problema, esporrò poscia i risultamenti da me ottenuti in seguito ad una estesa serie di esperimenti.

Misure dirette sulla velocità del suono nell' acqua.

Le misure effettuate dai fisici per riconoscere con metodi diretti la velocità colla quale l'acqua trasmette i suoni, sono assai più recenti di quelle effettuate nell' aria. Gli Accademici del Cimento non avendo potuto affermare se l'acqua fosse o no compressibile, i fisici la ritennero per molto tempo come un corpo duro, cioè privo di elasticità e quindi non atto a trasmettere i suoni. Per altro l' abate Nollet descrive, nel suo trattato di Fisica (3), una elegante esperienza, colla quale dimostra che l'acqua conduce il suono.

(1) *La velocità del suono nel cloro.* « Atti del R. Istituto veneto », vol. 12, serie V.

(2) *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 13, p. 20.

(3) *Lezioni di fisica sperimentale dell' abate Nollet*, tradotte sull' edizione francese del 1759. Venezia, Pasquali, 1762, t. 3, pagina 372.

Nollet dice di aver preso una sveglia, o soneria, e collocatala sopra una piastra di piombo, la coprì con una campana di vetro che saldò sulla piastra con della cera. Indi sostenendo la piastra con quattro fili, immerse il tutto in un gran recipiente pieno d'acqua purgata d'aria, e il suono della sveglia si faceva sentire tuttochè attorniata da più pollici d'acqua per ogni verso.

Nollet trae argomento da questa esperienza per combattere la falsa opinione che i liquidi non siano compressibili, imperocchè se ciò fosse non avrebbero elasticità e quindi sarebbero incapaci di moto vibratorio. L'esperienza del Nollet è pregevole perchè anteriore a quella del Canton (1761), che primo dimostrò la compressibilità dell'acqua, e ne dette una approssimata misura (1).

Se Nollet aveva mostrato con ingegnosa esperienza che l'acqua trasmette i suoni, Franklin si era fatto sicuro che il rumore di due ciottoli urtati sott'acqua si udiva anche a mezzo miglio di distanza. Ma Franklin non pensò a misurare la velocità con cui propagasi l'urto sentito, e la sola esperienza che si conosca, prima della celebre fatta da Colladon e Sturm, è l'esperienza del Beudant eseguita nel mare presso Marsiglia.

Due osservatori stavano in due battelli, posti ad una distanza nota, ed erano muniti di orologi che andavano d'accordo. A un dato momento colui che doveva produrre il suono alzava una bandiera, e nello stesso tempo batteva una campana immersa nell'acqua. L'osservatore posto nell'altra stazione era accompagnato da un uomo che notava nelle vicinanze del battello tuffandosi tratto tratto nell'acqua; quando il notatore udiva il suono faceva un segnale, e così l'osservatore aveva la misura del

(1) *Esperiences to prove that water is not incompressible.* « Phylosophical Transactions », t. 52.

tempo che impiegava il suono a percorrere la distanza delle due stazioni. Ma siffatta misura doveva riuscire alquanto inesatta, perchè la persona che si tuffava per cogliere il suono non poteva dare i segnali colla prontezza voluta. Beudant concluse dalle sue esperienze che la velocità del suono nell' acqua del mare è di 1500^m al m. s. (1).

Colladon e Sturm, che avevano impreso la ricerca del coefficiente di compressibilità dei liquidi, vollero, mediante una esperienza diretta e più esatta di quella eseguita dal Beudant, verificare i risultamenti ottenuti col piezometro di loro invenzione (2). A questo fine eseguirono una esperienza accuratissima nell'acqua del lago di Ginevra, che qui brevemente descriveremo.

Furono scelte due stazioni, di cui si conosceva esattamente la distanza (13487^m), che aveva già servito alla triangolazione della vallata del Lemano. Nelle due stazioni furono solidamente legati due battelli; dall' uno pendeva una campana alta 70 centimetri e larga, presso a poco, egualmente; la campana stava sott' acqua alla distanza di un metro dal livello. Alla stessa barca era pure fissata una leva angolare, che portava un grosso martello col quale si doveva battere la campana; tutto era disposto in modo che, nell'atto che il martello colpiva la campana, una miccia adattata all' altra estremità della leva dava fuoco ad un mucchio di polvere. L' osservatore posto nell' altra barca era provveduto di un apparecchio atto a ricevere il suono trasmesso dall' acqua; cotesto apparecchio era un tubo di bandone sottile, pieno d' aria, che pescava nell' acqua, chiuso nella parte immersa ch'era svasata e volta nella direzione della campana. All' altra parte del tubo che usciva dall' acqua, l' osservatore doveva applicare

(1) *Annales de Chimie et de Physique,* anno 1827, p. 241.
(2) Idem id. anno 1827.

l'orecchio per raccogliere il suono. Quando nella prima stazione si lasciava libero il martello, desso veniva a battere sulla campana e nello stesso tempo si accendeva la polvere. L'osservatore dell'altra stazione notava la differenza di tempo che correva fra la visione del lampo e l'audizione del colpo, e dopo una serie di esperimenti trovarono che il tempo impiegato dal suono a percorrere la distanza di 13487^m, è di $9'',4$. Da questo numero risultava per la velocità del suono nell'acqua 1435^m al m. s. essendo la temperatura di $8^0,1$.

Supposta la temperatura di 4^0, sostituendo nella formola

$$v = \sqrt{\frac{0,76\Delta g}{c \times d}}$$

i dati numerici, poichè $\Delta = 13,596$, $g = 9,8088$, $c = 0,00005$, $d = 1$, si ha

$$v = 1420 .$$

La velocità dedotta dalla formula può ritenersi identica con quella trovata mediante l'esperienza, imperocchè la piccolissima differenza che vi si riscontra, deve ritenersi dovuta agli errori inevitabili nelle osservazioni anche le più precise. La identità dei risultamenti mostra pure che nei liquidi, a differenza dei gas, il calore sviluppato dalla compressione è nullo, o almeno è troppo poca cosa per avere una influenza sensibile sulla velocità del suono.

Misure indirette per la velocità del suono nell' acqua e negli altri liquidi.

Cagniard de Latour.

Nell' acqua soltanto si può valutare per una via diretta la celerità di propagazione del suono. I metodi indiretti

per valutare siffatta volocità negli altri liquidi non sono così facili come dapprima sembrerebbe, e ciò per le difficoltà che trovarono i fisici a far vibrare i liquidi e quindi applicare le leggi usate per i gas.

Cagniard de Latour ottenne per il primo dei suoni purissimi coi liquidi servendosi della sirena (1). Siffatto ingegnoso strumento è così noto che torna inutile descriverlo. Diremo soltanto che il dott. Robisson aveva ideato un mezzo per ottenere il suono in un tubo spingendovi un getto d'aria reso intermittente mediante il gioco di una chiavetta animata di moto oscillatorio rapidissimo (2). Ma col detto mezzo il Robisson non giunse ad ottenere che due suoni stante la difficoltà di produrre il va e vieni della chiavetta oltre un certo limite di velocità. Il Robisson poi non dice di non aver fatto alcuna esperienza coll'acqua, sicchè il merito della invenzione della sirena spetta per intero al Cagniard Latour.

Cagniard de Latour non si fermò soltanto a far vibrare l'acqua colla sirena, ma ideò pure altri mezzi. Mediante un tubo, di cui un'estremità andava restringendosi, lasciando un piccolo foro circolare, apparecchio che l'inventore chiamò *pipetta fischiante*, Cagniard Latour otteneva dei suoni sia facendo salire l'acqua nel tubo per aspirazione, sia lasciandola effluire dopo averlo riempiuto. Con questo esperimento si ottenevano dei suoni, in generale, tanto più gravi quanto più alta era la colonna liquida; ma la progressione dei suoni era interrotta da dei bruschi passaggi da un suono grave ad altro acuto: risultati analoghi a quelli ottenuti dal Savart e che descriveremo più lungi. Ma gli esperimenti più interessanti, perchè segnano i primi

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, t. 12, p. 167, anno 1819.
(2) *Enciclopedia britannica*, anno 1801, pag. 649 e 650.

tentativi per misurare la velocità del suono nei liquidi, sono i seguenti [1].

Cagniard de Latour prendeva un tubo abbastanza lungo chiuso da una parte; lo riempiva d'acqua, indi lo strisciava longitudinalmente con un panno bagnato; otteneva in tal guisa un suono assai più grave di quello che avrebbe dato il tubo senza liquido. Per es., con un tubo lungo 1 metro e del diametro di 12^{mm}, ebbe un suono di 790 vibrazioni semplici al minuto secondo.

Cagniard de Latour riteneva che il suono fosse principalmente dovuto alle vibrazioni longitudinali della colonna liquida, e perciò le chiamò *vibrazioni idrauliche*. Cambiando il liquido, cambiava pure anche il suono; talvolta il suono era più acuto di quello ottenuto coll'acqua, talaltra più grave. Cagniard Latour sperimentò coll' alcool, coll' ammoniaca, coll' acido solforico, coll' etere, col solfuro di carbonio, e con diverse soluzioni saline.

Trovò pure che coll' accrescere la lunghezza dei tubi si avevano dei suoni più gravi; e misurando, rispetto all'acqua, la lunghezza dell'onda corrispondente al suono ottenuto, gli risultavano in certi casi dei numeri poco diversi da quelli che si avevano calcolando la lunghezza dell' onda in base alle ricerche dirette eseguite dal Bendaut. Cagniard de Latour non dice però in quali condizioni doveva mettersi per ottenere siffatta concordanza.

Felice Savart.

Un altro metodo per mettere in vibrazione i liquidi è quello immaginato da Felice Savart, e che fu descritto nei *Resoconti dell'Accademia di Francia* [2]. Savart prendeva

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3.me Sèrie, t. 56, p. 280.
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 37, n. 208.

un tubo di vetro abbastanza lungo e aperto da ambo le parti. Ad un estremo del tubo fissava con del mastice una piastra metallica forata nel mezzo; quando il foro eguagliava, in diametro, lo spessore della piastra, si avevano i migliori suoni. Riempiuto d' acqua il tubo e poi lasciando effluire il liquido per il foro, si producevano dei suoni talvolta assai forti e bene intonati. Savart cercò il valore musicale dei detti suoni che avevano origine dalle pulsazioni della vena liquida effluente; e, sperimentando con dei tubi di varia lunghezza, trovò che i suoni scemavano in altezza col diminuire della carica, e variavano pure col cambiare l' ampiezza del foro. Savart aveva già dimostrato, nei suoi anteriori studii sulla costituzione della vena liquida, le leggi riguardanti il numero delle pulsazioni, sia per rapporto alla carica, sia per rapporto al diametro del foro; e dall'esame fatto sui suoni, prodotti dall'efflusso, credette di poter stabilire che fossero retti dalle stesse leggi, cioè:

1.° *che il numero delle vibrazioni, corrispondenti al suono prodotto dall'efflusso, è proporzionale alla radice quadrata della carica;*

2.° *che il numero delle vibrazioni è in ragione inversa del diametro del foro.*

Vedremo più lungi qual valore abbiano queste leggi, e qual partito se n' è potuto trarre per istudiare la elasticità dei liquidi.

Esperienze del Wertheim.

Ma veniamo ora alla descrizione degli esperimenti che hanno condotto a determinare, per via indiretta, la velocità del suono nell' acqua e negli altri liquidi.

Wertheim è stato il primo a produrre dei suoni facendo parlare i tubi a imboccatura di flauto mediante un

liquido nel quale erano compiutamente immersi [1]. Egli si serviva di tubi formati di parecchie parti, che potevano, a volontà, essere separate o riunite, affine di calcolare l'errore prodotto dalla imboccatura e dall' eccesso sulla lunghezza del tubo.

Per fare queste osservazioni, Wertheim si serviva del metodo da lui adoperato per determinare la velocità del suono nell' aria. Sieno L_1 ed L_2 la lunghezza di due differenti tubi, che supporremo aperti, perchè Wertheim non potè, per i liquidi, che sperimentare su siffatti tubi; siano n_1 ed n_2 i numeri delle vibrazioni corrispondenti ai loro suoni fondamentali, e v_1 e v_2 le velocità non corrette. Si avrà

$$v_1 = L_1 n_1 \quad ; \quad v_2 = L_2 n_2 \ ,$$

e se $L_1 < L_2$ sarà $n_1 > n_2$; e poichè risulta dall'esperienza che $v_2 > v_1$, chiamando x ed y le correzioni dell'imboccatura e dello spostamento della superficie nodale, espresse in frazione della lunghezza del tubo, si ha

$$x + y = \frac{v_2 - v_1}{n_1 - n_2} \ .$$

Per ottenere coi liquidi dei suoni puri, Wertheim usò molte cure per non confondere il vero suono del cilindro liquido con altri suoni che si producono di frequente; imperocchè un po' di polvere rimasta in sospensione, qualche bolla d'aria aderente alle pareti o alla bocca del tubo, bastano per sturbare e talvolta alterare profondamente il suono. Wertheim formava le labbra dell' imboccatura con due lamine fissate per mezzo di guide, e ciò coll'intendimento di poterle mettere in conveniente positura prima di saldarle. L'esperienza gli dimostrò, che la bocca del tubo dev' essere meno lunga e meno larga che per l' aria; la luce deve

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3.me série, t. 23.

essere più grande, e la falda liquida che sfugge dalla luce deve inclinarsi un poco verso l' interno del tubo.

Wertheim cominciò le sue ricerche sperimentando coll' acqua, e per mezzo di un grande apparecchio riconobbe che il suono prodotto è indipendente dalla positura del tubo nel seno del liquido e dalla massa del liquido. Wertheim immaginò poi un altro apparecchio che gli permise di operare su quantità molto più piccole di liquidi diversi. L'apparecchio consisteva in un serbatoio di zinco alto 52 centimetri terminato alla parte superiore da un ampio bacino; nel fondo era invitato il tubo sonoro. Dopo aver riempiuto di liquido il serbatoio, mediante una pompa si aspirava il liquido, che poi veniva iniettato in un recipiente ad aria compressa da dove era spinto, mediante apposito condotto, nel tubo sonoro. Il valore musicale dei suoni era precisato mediante il sonometro, la cui corda, lunga 1^m, era in accordo col do_2 di 256 vibrazioni semplici al m. s. Chiamando l il segmento di corda che vibrava all'unisono col suono dato dal tubo, si aveva

$$n = \frac{256 \times 1000}{l} .$$

In questa valutazione v'è da segnalare un errore, cioè che il suono fondamentale non è rigorosamente costante ma varia, dentro certi limiti, colla velocità della corrente. Si può allora calcolare il suono fondamentale deducendolo dagli armonici, ma si trova che questo suono è tanto più acuto quanto è più elevato l'armonico; la qualcosa si osserva pure nei tubi fatti parlare coi gas. Per evitare questo inconveniente, il Wertheim aveva cura, ogniqualvolta adoperava tubi di diversa lunghezza, di sperimentare colla medesima imboccatura e colla stessa pressione. Quando poi le lunghezze erano molto diverse, i valori del suono fondamentale, dedotto dai primi armonici, differivano assai poco e

si rendeva inutile il tener calcolo della pressione. Wertheim tentò pure più modi, ma senza averne alcun esito soddisfacente, di precisare la positura dei nodi.

Con siffatto procedimento eseguendo una lunga serie di ricerche, Wertheim determinò dapprima la velocità del suono nell'acqua e la trovò, in media, eguale $1173^m,4$ al m. s., essendo la temperatura di 15°. Questo numero è molto inferiore a quello trovato da Colladon e Sturm coll' esperienza diretta; e siffatta discrepanza non poteva spiegarsi, secondo Wertheim, seguendo l'antica teorica del movimento dei fluidi, nella quale si ammette l'eguaglianza di pressione in tutti i versi, anco quando si tratti delle rapide vibrazioni che generano il suono o che lo trasmettono. Wertheim aveva già dimostrato in altra Memoria, che la velocità del suono in una massa solida illimitata sta a quella che ha luogo in un cilindro della stessa sostanza come $\sqrt{\frac{3}{2}} : 1$. Codesto risultamento teorico non era stato verificato con nessuna prova, e l' acqua era il solo, fra i corpi solidi e liquidi, nel quale si potevano misurare le due velocità. Ammesso adunque che la legge trovata per i solidi fosse applicabile ai liquidi, Wertheim moltiplicò la velocità trovata per $\sqrt{\frac{3}{2}}$ e trovò che il prodotto

$$1173,4 \times \sqrt{\frac{3}{2}}$$

risultava eguale a 1437^m, cioè un numero identico con quello trovato da Colladon e Sturm. La coincidenza di questi numeri proverebbe, che la legge dimostrata da Wertheim per i solidi si estende anche ai liquidi, e che perciò l'eguaglianza di pressione in tutti i versi non ha luogo durante le loro vibrazioni sonore. In questo aspetto, quando una colonna liquida vibra longitudinalmente, deve dare lo

stesso suono che darebbe una sostanza solida la cui compressibilità cubica è eguale a quella del liquido.

Fondandosi su questa legge, Wertheim determinò, col modo anzidetto, la velocità del suono nell'acqua del mare, nell'alcool, nell'etere e in varie soluzioni, facendo altresì variare la temperatura. Ecco quali sono i risultamenti ottenuti, i quali tutti rappresentano la velocità trovata coll'esperienza e moltiplicata per $\sqrt{\frac{3}{2}}$.

Nome dei liquidi	Temperatura	Densità	Velocità del suono		Compressibilità
			in una colonna	in una massa illimitata	
Acqua della Senna	15°.0	0,9996	1173,4	1437,1	0,0000491
» » »	30 .0	0,9963	1250,9	1528,5	0,0000433
» » »	40 .0	0,9931	1324,8	1622,5	0,0000388
» » »	50 .0	0,9893	1349,0	1652,2	0,0000375
» » »	60 .0	0,9841	1408,2	1724,7	0,0000346
» del mare(artificiale)	20 .0	1,0264	1187,0	1453,8	0,0000467
Dissoluz.e di cloruro sodico	18 .0	1,1920	1275,0	1561.6	0,0000349
» solfato »	20 .0	1,1089	1245,2	1525,1	0,0000393
» » »	18 .8	1,1602	1292,9	1583,5	0,0000348
» carbonato »	22 .2	1,1828	1301,8	1594,4	0,0000337
» nitrato »	20 .9	1,2066	1363,5	1669,9	0,0000301
» cloruro calcico	22 .5	1,4322	1616,3	1979,6	0,0000181
Alcool a 36°	20 .0	0,8362	1049,9	1285,9	0,0000733
» assoluto	23 .0	0,7960	947,0	1159,3	0,0000947
Essenza di trementina	24 .0	0,8622	989,8	1212,3	0,0000800
Etere solforico	00 .0	0,7529	946,3	1159,0	0,0001002

Le compressibilità trovate dal Wertheim mediante la formula

$$c = \frac{g \times 0{,}76 \times \Delta}{dv^2},$$

che si trovano nell'ultima colonna della tavola, concordano assai bene con quelle trovate dal Grassi mediante il piezometro modificato dal Regnault. Parrebbe adunque che la ipotesi del Wertheim, giustificata per l'acqua dall'esperienza diretta, fosse pur anche giustificata per gli altri liquidi dal fatto che risultano, per le loro compressibilità, dei numeri abbastanza concordanti con quelli ottenuti per altra via. Ma la pluralità dei fisici opina, che la concordanza non sia che fortuita, e, seguendo le idee del Helmholtz e dell'Andrè, attribuiscono la piccolezza delle velocità trovate dal Wertheim alle vibrazioni comunicate alle pareti dei tubi; le quali, rispetto ai liquidi, si conterrebbero come i tubi d'organo a pareti sottilissime, dove i suoni risultano assai più gravi di quelli ottenuti con pareti grosse.

Le posteriori esperienze fatte dal Kundt, il quale trovò che la velocità del suono in un liquido cresce coll'aumentare lo spessore delle pareti del tubo, starebbero pure a provare che la ipotesi del Wertheim non è ammissibile. Nulladimeno non tutti i fisici sono contrari a siffatta ipotesi; e il Jamin, la cui autorità è di gran peso, ritiene ammissibile la legge del Wertheim, e non crede assurdo che la trasmissione laterale delle pressioni, nel seno di una massa liquida, non sia un fenomeno istantaneo, come dovrebbe avvenire se la detta ipotesi fosse esatta [1].

Prendendo ora in breve esame i valori ottenuti dal Wertheim, noteremo che quelli della quarta colonna, che rap-

(1) Jamin et Bouty, *Cours de physique;* Gauthier-Villars, 1881, t. 3, p. 111.

presentano le velocità trovate coll'esperienza, risultano dalla media di numerosi esperimenti fatti con diversi tubi.

Per i confronti, che dovrò fare in seguito fra i numeri ottenuti dal Wertheim ed i miei, trovo opportuno di far conoscere le differenze fra i valori massimi e minimi che l'illustre fisico trovò per uno stesso liquido. Per esempio, riguardo all'acqua, osserviamo che in un tubo d'ottone, indicato colla lettera A, il valore minimo è di 1127^m e il massimo di 1202^m colla differenza di 75^m; e il valore massimo avuto con un altro tubo indicato dalla lettera B, è di 1230^m, cioè con una differenza di 103^m in confronto del primo. Per l'alcool assoluto ebbe il Wertheim, col tubo A, 906^m e 1024^m; differenza 118^m; e col tubo B ebbe il valore minimo di 866^m, cioè con la differenza di 158^m in confronto del valore massimo ottenuto col tubo A. Per l'essenza di trementina ottenne, col tubo A, 1057^m e col tubo B 903^m; differenza di 154^m. Coll'etere solforico il Wertheim fece un solo esperimento, che contrassegnò con un punto interrogativo, non essendo sicuro del risultamento ottenuto.

Esperienza di Andrè (1).

Si è detto poc'anzi che l'Andrè si oppose alla ipotesi del Wertheim, ed eccone la ragione. Dovendo l'Andrè assistere alla deposizione di un condotto tubulare di ghisa del diametro di $0^m,80$, volle profittare di siffatta occasione per fare una nuova misura sulla velocità del suono nell'acqua. L'Andrè sperimentò sopra una lunghezza di $603^m,25$ e si servì di un registratore pneumatico che rendeva palesi i più piccoli movimenti provocati nella massa liquida. La temperatura dell'acqua variava fra i 13 e i 20 gradi, e in siffatte condizioni l'Andrè trovò per la velocità del suono nell'acqua

(1) *Comptes-rendus de l'Académie des sciences;* t. 62, p. 568.

807^{m},8 al minuto secondo, cioè un numero ancor minore di quello che per lo stesso liquido trovò il Wertheim innanzi di fare la correzione (1173^{m}). Andrè attribuì la forte differenza, fra la trasmissione in una massa limitata e quella in una massa indefinita, alla elasticità ed all'attrito delle pareti, fra le quali trovavasi racchiuso un fluido così poco compressibile quale è l'acqua. Ma ritorneremo più tardi su questa esperienza, perchè alle ragioni addotte dall' Andrè potrebbero aggiungersene delle altre.

Esperienze di Kundt e Lehmann.

È noto come il prof. Kundt sia riuscito a rendere manifeste le vibrazioni dei gas nei tubi chiusi, scotendoli per mezzo di una verga fatta vibrare longitudinalmente. Se nel tubo si è avuto cura di porre una polvere leggiera ed asciutta, per es. della polvere di licopodio o di silice, tosto che l'aria vibra, la polvere si agita vivamente riunendosi in lamine sottili e normali alla lunghezza del tubo; ma quando cessano le vibrazioni, la polvere cade, e là, dov' era una concamerazione, si osserva la polvere solcata da strie trasversali; la mancanza di cotali strie denota una regione nodale, e la distanza fra due regioni contigue rappresenta la lunghezza dell' onda.

Kundt e Lehmann (1) cercarono di produrre gli stessi fenomeni nei liquidi, imperocchè se riusciva di misurare la lunghezza fra due nodi contigui, si aveva un facile mezzo per calcolare la velocità del suono. A questo fine idearono un apparecchio, che consiste in un tubo di vetro, chiuso da una parte e munito di due *rubinetti*, che debbono servire per riempirlo del liquido da sperimentare. L'estremità aperta del tubo viene otturata con un tappo di cautchouc, a

(1) *Poggendorfs Annalen;* t. 153, p. 1.

traverso del quale passa una verga di vetro destinata a provocare le vibrazioni del liquido; questa verga è fissata al quarto della sua lunghezza e perciò è capace di sonare il suo secondo armonico.

Fra le condizioni necessarie perchè la colonna liquida possa vibrare per risonanza, v'ha quella che non rimangano bolle d'aria nel seno del liquido, e neppure aderenti alle pareti. La miglior polvere da impiegare, perchè sieno manifeste le vibrazioni, è la limatura di ferro. Facendo adunque vibrare longitudinalmente la verga di vetro, la polvere forma nei ventri delle strie analoghe a quelle che si osservano nei gas, e resta aderente alle pareti del tubo, senza alcun segno, nelle regioni nodali.

Se l'estremità del tubo, opposta alla verga, è chiusa, ivi si forma un nodo; se poi la chiusura, invece di essere rigida, è fatta con una membrana di cautchouc, si forma un ventre. Ma qualunque sia il modo di contenersi dell' estremità del tubo, se si misura la distanza di due nodi, presi nella parte mediana, si ha, con sufficiente esattezza, il valore della semionda corrispondente al suono prodotto dal liquido.

L' esperienza riesce più precisa quando si fa mobile la parte chiusa; e ciò si ottiene mediante uno stantuffo, scorrevole nell' interno del tubo, che permette di accordare la colonna liquida col suono prodotto.

Colla stessa verga si scuote poscia un cilindro d'aria, e colla polvere leggiera si determina la lunghezza dell' onda prodotta dallo stesso suono. Chiamando l ed l' le due lunghezze, v e v' le velocità con cui il suono si propaga nell' aria e nel liquido, si ha

$$v = v', \times \frac{l}{l'}.$$

E poichè v, v', velocità del suono nell'aria, è data dalla formula

$$331^{m}\sqrt{1+at},$$

chiamando r il rapporto fra le due lunghezze d'onda, si avrà

$$v = 331\, r\sqrt{1 \times at}\,.$$

Con questo metodo i due fisici sperimentando sull'acqua, e con dei tubi di vario diametro aventi le pareti più o meno grosse, trovarono i seguenti risultamenti:

Spessore delle pareti	Diametro interno del tubo	Velocità determinata
$2^{mm},2$	$28^{mm},7$	$1040^{m},0$
3 ,0	34 ,0	1227 ,0
3 ,0	23 ,5	1262 ,0
3 ,5	21 ,0	1357 ,5
5 ,0	16 ,5	1360 ,2
5 ,0	14 ,0	1383 ,2

Da questo specchio apparisce, che le velocità divengono tanto maggiori quanto più grande è lo spessore delle pareti, e quanto minore è il diametro interno del tubo; e siffatto risultamento verrebbe a confermare le obiezioni che Helmholtz e Andrè fecero alla ipotesi del Wertheim.

PARTE II.

Nuove esperienze per determinare la velocità del suono nei liquidi.

Nella parte testè svolta ho cercato di raccogliere tutte le prove fatte dai fisici per misurare la velocità del suono nei liquidi. Consultando le effemeridi più riputate, che di solito raccolgono tutto ciò che v' ha di più importante nella scienza, non ho trovato che i lavori da me brevemente descritti ; debbo perciò ritenere che null'altro siasi compiuto in ordine a siffatto studio.

Le nuove ricerche da me effettuate si fondano sui fenomeni studiati dal Savart riguardo ai suoni prodotti dallo efflusso dei liquidi. Imperocchè ripetendo, ad uso della scuola, il fatto singolare scoperto dal celebre fisico, mi accorsi che i risultamenti non corrispondevano a quelli indicati dal Savart. I suoni, piuttosto che diminuire d' altezza col diminuire della carica, presentavano il fenomeno contrario. E volendo indagare per quali cause non si verificavano le leggi del Savart, intrapresi su questi suoni una lunga serie di ricerche, variando pur anche il metodo di sperimentare, affine di mantenere il suono per un tempo abbastanza lungo per valutarne con esattezza il valore musicale.

Col metodo, che descriverò fra poco, potei non solo studiare i suoni prodotti dall' efflusso di un liquido, ma anche quelli che si avevano facendo affluire il liquido nell' interno della canna; e, variando la lunghezza dei tubi, il loro diametro nonchè quello dei fori di efflusso o di afflusso, resi più compiuto lo studio iniziato dal Savart.

I risultamenti di siffatte esperienze furono pubblicati

negli *Atti del R. Istituto veneto* (1) e comparvero pure, in sunto, in alcune effemeridi straniere (2).

Riepilogando i principali risultamenti delle citate Memorie, si trova:

1.° *Perchè il suono possa prodursi, è necessario che il numero delle pulsazioni dovute alla periodicità dell' efflusso, che sono la causa del suono, sia all' unisono col suono che potrebbe dare la colonna liquida, ovvero con un suo armonico.*

2.° *Il suono ottenuto, sia per efflusso, sia per afflusso, si fa sempre più acuto quanto minore è la lunghezza del cilindro liquido vibrante.*

3.° *Da uno stesso cilindro liquido si possono cavare più suoni, cioè un suono basso, che chiameremo fondamentale, e due o tre suoni più acuti, che rappresentano gli armonici del fondamentale.*

4.° *Un cilindro liquido, che si fa vibrare per afflusso, a parità di lunghezza e di diametro, dà quegli stessi suoni che si ottengono per efflusso.*

5.° *Due cilindri liquidi simili, fatti vibrare per efflusso o per afflusso, danno dei suoni, i cui numeri di vibrazioni sono in ragione inversa delle dimensioni omologhe.*

6.° *Tenendo costante la lunghezza del cilindro liquido, e fattolo vibrare per afflusso, i numeri delle vibrazioni sono direttamente proporzionali alla radice quadrata della carica.*

L'esame dei detti risultati dimostra, che il fenomeno è assai complesso, e che il Savart aveva tenuto soltanto conto di una parte del medesimo, cioè del moto periodico della

(1) Tomo VII, serie V, p. 961 e tomo II, serie VI, p. 109.

(2) *Journal de Physique théorique et appliquée;* 2.me série, t. I, p. 514; e *Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie;* t. VIII, fascicolo 11, p. 798.

vena che è la causa del suono. Il rapido effluire del liquido dalla canna non permetteva al Savart di valutare con precisione i suoni ; perciò fu tratto in errore, e credette che le stesse leggi da lui scoperte per le vene liquide, militassero anche per i numeri delle vibrazioni dei suoni ottenuti. I risultamenti sopra citati concordano con quelli ottenuti dal Masson nelle sue importanti ricerche sui suoni prodotti dall' efflusso dei gas (1), i quali, effluendo a periodi come i liquidi, debbono produrre fenomeni analoghi.

Oltre le leggi sopra citate dimostrai pure, nella I.ª Memoria (2), che variando il liquido varia, a parità di altre circostanze, anche il suono. Coll' alcool e coll' etere ottenni dei suoni più gravi di quelli dati dall'acqua, perchè più compressibili. Mi valsi allora di questo fatto per valutare la velocità con cui quei liquidi trasmettevano il suono, ed ottenni dei numeri assai prossimi alle velocità corrette avute dal Wertheim. Ma in quel primo studio non avevo tenuto conto di tutte le influenze che possono modificare il fenomeno, perciò quei risultamenti debbono ritenersi come una prova preliminare di poco valore.

Descrizione del metodo.

I suoni, come abbiam detto più innanzi, possono ottenersi sia per efflusso, sia per afflusso. Si possono adoperare delle canne di vetro o di ottone, che si ha cura di ben lavare con una soluzione di potassa, e poscia coll'acqua, perchè il liquido aderisca bene alle pareti. Alle canne d'ottone è saldata a stagno una piastra, pure d'ottone, che ha un diametro eguale a quello del tubo. Nel centro della piastra è

(1) *Annales de Chimie et de Physique ;* 3.me serie, t. 40, p. 333.

(2) *Atti del R. Istituto veneto,* t. VIII, serie V, pag. 961.

praticato un foro circolare, il cui diametro eguaglia lo spessore della piastra ; in tutti gli esperimenti che descriverò vennero adoperate delle piastre il cui foro aveva un diametro di $2^{mm},5$. Se poi le canne sono di vetro, si salda la piastra con del mastice.

Fissato il tubo in positura verticale e chiuso il foro con uno zipolo di legno, si riempie di liquido, il quale scende da un ampio serbatoio di zinco, posto in alto, munito di rubinetto. Quando il tubo è pieno, si ha gran cura di cacciare tutte le bolle d'aria che sono rimaste aderenti alle pareti, le quali hanno una grandissima influenza sull'altezza del suono, come già fu riscontrato dal Savart e dal Wertheim. Aprendo il foro il liquido effluisce, e il suono comincia a farsi sentire. Allora si regola il rubinetto del serbatoio in modo che il tubo rimanga sempre pieno, ovvero, calando convenientemente il tubo di afflusso nell'interno della canna, si regola il rubinetto in guisa, che il liquido si mantenga ad un livello costante in uno o in altro punto della canna, e in tal modo si può valutare con precisione il suono mediante il sonometro.

Sperimentando in tal guisa si ottengono, in generale, dei suoni che crescono in altezza col diminuire della lunghezza del cilindro liquido. Dico in generale, perchè talvolta da un suono grave si passa ad uno più acuto, per poi tornare al grave, che si alterna con altri acuti, e talvolta non si ode alcun suono. Ciò proviene dal non esservi accordo fra il numero delle pulsazioni della vena e il suono che potrebbe dare il cilindro liquido vibrando tutto intero. Risulta adunque che, in luogo del suono grave o fondamentale, apparisce un suono acuto, che suole essere un armonico del fondamentale, ovvero, per assoluta mancanza d'accordo, non ha luogo alcun suono.

Per togliere questo gravissimo inconveniente, immaginai un mezzo semplice che permette d'avere un suono in qua-

lunque punto si mantenga il livello nell'interno della canna. Feci saldare alla piastra un piccolo cannello d'ottone, che circoscriveva il foro, e vi adattai un tubo di gomma nel quale era infilato un rubinetto. Allora regolando i due rubinetti, cioè quello del serbatoio e quello di efflusso, si poteva, con un po'di pazienza, mantenere costante il livello in qualunque punto della canna, e cavare da un dato cilindro liquido il suono fondamentale e alcuni dei suoi armonici.

Siffatto metodo ha però un difetto; imperocchè variando il livello del liquido nel serbatoio, varia pure la quantità di liquido che affluisce nella canna, e quindi è necessaria una quasi continua manovra nei rubinetti perchè il livello rimanga costante.

Credetti dunque opportuno di abbandonare i suoni prodotti dall'efflusso e servirmi di quelli ottenuti per afflusso, avendo ormai riscontrato che, a parità di lunghezza del cilindro liquido, si ottengono gli stessi suoni.

L'esperienza era disposta così: dal serbatoio partiva un tubo di gomma, non vulcanizzata, che andava a cingere la cannetta saldata alla piastra. Il tubo di gomma era di due pezzi riuniti per mezzo di un rubinetto che, in certe esperienze, era di ottone, in altre d'ebanite.

Il rubinetto del serbatoio rimaneva sempre aperto, e il maneggio aveva luogo soltanto col secondo rubinetto. Quando il liquido giungeva nella canna ad un'altezza di 18 o 20 centimetri, cominciavano a sentirsi i suoni che diminuivano via via d'altezza col crescere del livello. Riempiuta la canna, il liquido, scorrendo lungo le sue pareti esterne, si raccoglieva in un bacino dal quale veniva rimesso nel serbatoio superiore. Col secondo rubinetto, aperto più o meno, si otteneva il suono fondamentale o gli armonici, e questi suoni si valutavano mediante il sonometro, la cui corda, lunga 1^m, era accordata col do_2 di 256 vibrazioni semplici al minuto secondo, dato da un diapason di König.

Da principio si usava fissare il tubo lungo una tavola di legno verticale, dalla quale era tenuto discosto per mezzo di cuscinetti di gomma. Ma per meglio evitare le possibili perturbazioni dovute agli appoggi, si pensò d'isolare completamente il tubo, e quindi lo si faceva sostenere da un anello legato a tre cordicelle che potevano allungarsi ed accorciarsi affine di ottenere la verticalità del tubo. Il serbatoio si trovava ad un' altezza di $1^m,30$ contata dalla parte inferiore del tubo; ma questa altezza si faceva variare a seconda delle circostanze; e poichè il serbatoio era assai ampio, le variazioni di livello, durante un esperimento, erano così piccole da potersi ritenere la pressione come costante. Del resto, con una leggera correzione del rubinetto, si poteva facilmente ricondurre il suono ad avere lo stesso vigore e la stessa altezza.

Gli esperimenti coi varii liquidi e soluzioni furono eseguiti con diversi tubi di vetro e d'ottone, che contrassegno con delle lettere, i quali avevano le dimensioni seguenti.

Tubi d' ottone.

	Lunghezza	Diametro interno	Spessore delle pareti
Tubo A	$0^m,60$	$0^m,06$	$2^{mm},28$
» B	0 ,50	0 ,05	1 ,32
» C	0 ,40	0 ,04	0 ,82
» D	0 ,30	0 ,03	0 ,91
» E	0 ,20	0 ,02	0 ,87

Tubi di vetro.

Tubo *a*	lunghezza	$0^m,746$
» *b*	»	0 ,649
» *c*	»	0 ,546
» *d*	»	0 ,460

Il diametro di questi tubi era pressochè lo stesso, variando dai $29^{mm}\,{}^1/_2$ ai 30^{mm}, e lo spessore era di circa 3^{mm}.

Nella valutazione dei suoni si teneva il seguente procedimento: si poneva il ponticello in modo che il segmento di corda desse un suono più grave o più acuto di quello dato dal cilindro liquido; indi spostando il ponticello si cercava il segmento che vibrava all' unisono, il quale veniva misurato con un regolo diviso in mezzi millimetri. Per ciascun suono non si facevano meno di sei determinazioni, delle quali si prendeva la media.

Riguardo al suono fondamentale è da notare, che non ve n'ha uno solo ma diversi, alcuni più acuti, altri più gravi, ma dentro limiti abbastanza ristretti; cotal fatto fu pure osservato dal Masson (v. Memoria citata). Tutti questi suoni sono, peraltro, meno intensi e meno puri di quello preso come fondamentale. Si è poi osservato che i suoni limiti, fra i quali è compreso il fondamentale, danno una media eguale o ben poco diversa dal suono stesso. Sicchè può dirsi che questi suoni sono sfumature del fondamentale, prodotte da un afflusso più lento o più rapido; alla stessa guisa che soffiando con più o meno forza nel flauto, la stessa nota alza o cala.

Velocità del suono in una colonna d' acqua di lunghezza variabile.

I cilindri liquidi fatti vibrare nel modo anzidetto sembrano comportarsi come i tubi chiusi, o come le verghe solide fissate ad un estremo. Ammessa, in tal caso, l' esattezza delle leggi del Bernoulli, quando il tubo chiuso parla col suono fondamentale, l'onda sonora corrispondente è quadrupla della lunghezza del tubo, perciò $h = 4l$; e

poichè $v = nh$, chiamando n il numero delle vibrazioni doppie, ovvero $v = \frac{N}{2} h$ se N è il numero delle vibrazioni semplici, si avrà pure

$$v = 2Nl .$$

Partendo da queste considerazioni feci sonare un cilindro d'acqua chiuso in tubi di vetro di varia lunghezza, ma dello stesso diametro, e tutti con eguale imboccatura, perchè la stessa piastra passava dall' uno all' altro. Valutando col sonometro i numeri delle vibrazioni, e poi colla formula le velocità corrispondenti, si ottennero, alla temperatura di 4°,7, i seguenti risultamenti :

Lunghezza del cilindro d' acqua	Lunghezza della corda del sonometro	Numero delle vibrazioni semplici	Velocità calcolate
207^{mm}	$76^{mm},0$	3368	1394^{m}
300	107 ,0	2392	1435
324	110 ,0	2327	1507
342	114 ,5	2235	1521
546	175 ,5	1458	1592

I quali numeri dimostrano, che la velocità del suono va crescendo col crescere la lunghezza del cilindro liquido, quando il diametro si mantiene costante. Si osserva poi che, dato un certo rapporto fra il diametro e la lunghezza, si ottiene un numero coincidente colla velocità del suono nell' acqua determinata coll' esperienza diretta da Colladon e Sturm. Questo numero si trova corrispondente alla lunghezza di 300^{mm} ; e siccome il diametro dei tubi adoperati era di 30^{mm}, il rapporto della lunghezza al diametro è come 1 a 10.

Siffatto risultamento era stato da me constatato nello studio che forma la II Memoria sui suoni prodotti dall' efflusso dei liquidi [1]; e fu appunto per ciò che i tubi d' ottone, sopra descritti, furono costruiti in guisa che la lunghezza fosse decupla del diametro. E in ciò non v'è nulla di singolare, perchè è noto per pratica che una canna d'organo, sede di vibrazioni longitudinali, deve avere una lunghezza 10 a 15 volte superiore della profondità [2].

Ritenuto adunque che il rapporto di 1 a 10 fra il diametro e la lunghezza, rappresenti le dimensioni che deve avere un cilindro liquido per soddisfare, con discreta approssimazione, alle leggi del Bernoulli, intrapresi la ricerca della velocità del suono per l' acqua e per altri liquidi.

Velocità del suono nell' acqua a differenti temperature.

In questi esperimenti si sono prodotti i suoni coi cinque tubi d'ottone distinti colle lettere A, B, C, D, E. Rammentiamo che la corda del sonometro era all' unisono col Do_2 di 256 v. s. al m. s.; perciò se K è, in millimetri, il segmento di corda che vibra all'unisono col tubo, essendo 1000 l'intera corda, si ha

$$256 : n = K : 1000 ;$$

d' onde

$$n = \frac{256000}{K} ;$$

valore sostituito nella formula

$$v = 2Nl ,$$

(1) *Atti del R. Istituto veneto*, tomo II, serie VI.
(2) Masson, Memoria citata, p. 457.

da

$$v = \frac{256000 \times 2l}{K}.$$

Notiamo che le temperature alle quali si son fatte queste esperienze non erano ottenute artificialmente, ma sibbene erano quelle dell' ambiente, avendo avuto cura di fare gli esperimenti in varie stagioni dell' anno. Si adoperava l'acqua della cisterna del Liceo, limpidissima e pura, e che, rispetto all' acqua distillata, offriva differenze trascurabili.

Temperatura	Nome del tubo	Lunghezza del tubo	Lunghezza della corda	$v = \frac{256000 \times 2l}{K}$	Medie
3°,9	A	0m,60	227mm	1353m,2	1398m,6
	B	0 ,50	179	1435 ,7	
	C	0 ,40	148	1383 ,8	
	D	0 ,30	108	1422 ,0	
7°,6	A	0m,60	223mm,5	1374m,5	1409m,0
	B	0 ,50	. . . . .	. . . . .	
	C	0 ,40	145 ,5	1407 ,5	
	D	0 ,30	106 ,4	1442 ,0	
	E	0 ,20	72 ,5	1412 ,0	
13°,7	A	0m,60	219mm,5	1399m,4	1437m,3
	B	0 ,50	176 ,0	1454 ,5	
	C	0 ,40	143 ,3	1429 ,0	
	D	0 ,30	104 ,8	1466 ,2	
25°,2	A	0m,60	214mm,5	1432m,0	1457m,2
	B	0 ,50	174 ,0	1471 ,2	
	C	0 ,40	142 ,0	1442 ,2	
	D	0 ,30	103 ,6	1482 ,6	

Nella discussione, che faremo in seguito, si dirà la ragione delle differenze che si palesano fra tubo e tubo. Intanto poniamo a confronto questi risultati con quelli ottenuti sia con l' esperienza diretta, sia colla conoscenza del coefficiente di compressibilità. In questo caso la velocità del suono viene data dalla formula

$$v = \sqrt{\frac{0{,}76 \times \Delta \times g}{c \times d}}.$$

Si porrà nella formula $\Delta = 13{,}596$; $g = 9{,}8061$ (gravità di Milano), e per c si prenderanno i numeri ottenuti dal Grassi [1] a temperature che poco differiscono da quelle sotto le quali abbiamo sperimentato. Ecco il prospetto.

Temperatura	Velocità dedotta dall' onda sonora	Compressibilità secondo Grassi	Temperatura	Velocità dedotta dalla form.	Velocità ottenuta direttamente
3°,9	1398^m,6	0,0000499	4°,1	1425^m	
7 ,6	1409 ,0	. . . . .	8 ,1	. . .	1435^m
13 ,7	1437 ,3	0,0000477	13 ,4	1457	
25 ,2	1457 ,2	0,0004560	25 ,0	1491	

Il confronto fra cotali risultamenti dimostra, che i numeri da me ottenuti sono abbastanza conformi con quelli ricavati dalla formula, ovvero dalla misura diretta. La differenza più forte, che del resto giunge appena a 34^m su circa 1500, si riscontra per la temperatura di 25°. Ma si può notare che a siffatta temperatura i tubi hanno di-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3.me serie, t. 31 e p. 437.

mensioni maggiori che a temperature più basse; perciò contenendo una maggior massa di liquido, deve abbassare il suono, e quindi, per la velocità calcolata, deve trovarsi un numero minore in paragone di quello che si sarebbe avuto nella ipotesi che i tubi non si fossero dilatati. I detti esperimenti dimostrano un fatto, già notato dal Wertheim, cioè che la velocità del suono nell' acqua cresce colla temperatura, e perciò deve scemare il coefficiente di compressibilità, come si ricava dalle esperienze del Grassi. Per riconoscere viemmeglio l'influenza della temperatura sull'altezza del suono, ho pur fatto delle prove con tubi di vetro di varia lunghezza, ma dello stesso diametro (30^{mm}), ai quali si adattavano delle piastre aventi lo stesso foro ($2^{mm},5$). In questi tubi si faceva affluire dell' acqua scaldata ad una temperatura maggiore dell' ambiente, e talvolta, per fare i confronti, si faceva entrare dell'acqua che aveva la temperatura dell' ambiente.

Mostriamo i risultati ottenuti:

Temperatura dell' ambiente $4^0.4$

tubo	$a = 746^{mm}$	. . . . .	$l = 225^{mm},6$
»	$b = 649$	. . . . .	» $= 197\ ,7$
»	$c = 546$	. . . . .	» $= 172\ ,7$

Temperatura dell' ambiente $15^0.7$

tubo	$a = 746^{mm}$	. . . . .	$l = 218^{mm},7$
«	$b = 649$	. . . . .	» $= 192\ ,6$
»	$c = 546$	. . . . .	» $= 170\ ,7$

Acqua scaldata.

tubo	$a = 746^{mm}$	. . .	$l = 212^{mm},6$	(da $35^0.6$ a $34^0.5$)
»	$b = 649$	. . .	$l = 190\ ,0$	(» 35 .0 a 31 .0)
»	$c = 546$	. . .	$l = 166\ ,8$	(» 28 .0)

Nelle esperienze coll' acqua scaldata si aveva cura di mantenere nel liquido, mentre sonava, un termometro ad immersione. Il tubo e il bulbo erano così piccoli che potevano trascurarsi le lievi differenze prodotte dalla diminuzione della massa liquida.

Velocità del suono nell' alcool assoluto.

Le esperienze coll'alcool si sono eseguite in due modi; 1.° facendo sonare i tubi d' ottone e calcolando la velocità del suono nel modo stesso che si tenne per calcolare la velocità nell' acqua; 2.° provocando il suono in tubi di vetro pieni d' alcool o d' acqua, e deducendo la velocità mediante una proporzione nella quale entrava, come dato, la velocità del suono nell' acqua.

	Lunghezza del tubo	Temperatura	Densità	Lunghezza della corda	V locità	Medie
Tubo A	0^m ,60			242^{mm},5	1267^m	
B	0 ,50			202 ,0	1267	
C	0 ,40	3°.5	0,806	159 ,5	1284	1278^m,8
D	0 ,30			118 ,5	1296	
E	0 ,20			80 ,0	1280	
B	0^m,50			204^{mm},5	1251^m,8	
C	0 ,40	8°.4	0,804	162 ,0	1264 ,2	1263^m,5
D	0 ,30			120 ,5	1274 ,6	
A	0^m ,60			249^{mm},5	1231^m,2	
B	0 ,50	18°.4	0,796	207 ,0	1236 ,0	1241^m,1
C	0 ,40			164 ,0	1248 ,8	
D	0 ,30			123 ,0	1248 ,6	

Volendo determinare la velocità del suono in un liquido, conoscendo la velocità del suono nell' acqua, si chiamino n ed n' i numeri delle vibrazioni dei due cilindri liquidi di pari lunghezza, ed l, l' i segmenti di corda che vibrano all' unisono coi cilindri, si ha

$$n : n' = l' : l ;$$

e poichè i numeri delle vibrazioni sono in ragione diretta della velocità, a pari lunghezza di tubo, si ha

$$v : v_1 = l_1 : l.$$

Presa dunque per v la velocità del suono nell' acqua data dall' esperienza diretta, la velocità del suono nell'altro liquido sarà

$$v_1 = \frac{1435 \times l}{l_1} .$$

Per applicare cotal metodo conviene innanzi tutto sperimentare con tubi che abbiano una sufficiente lunghezza in confronto del diametro, perchè possa sussistere, almeno in via approssimata, l'eguaglianza

$$\frac{n}{n_1} = \frac{l_1}{l} .$$

Bisogna inoltre avvertire che siffatte esperienze non possono farsi che a temperature assai prossime a quelle sotto le quali Colladon e Sturm eseguirono la misura diretta della velocità del suono nell' acqua.

Applicato il detto metodo a misurare la velocità del suono nell' alcool, si sono avuti i seguenti numeri.

Tubo	Acqua l	Alcool l_1	$\frac{1435 \times l}{l_1}$
$a = 746^{mm}$	$218^{mm},6$	$252^{mm},0$	$1240^{m},8$
$b = 649$	192 ,0	222 ,5	1238 ,2
$c = 546$	169 ,5	194 ,5	1250 ,0
			media 1243^{m}
			temp. 13°.2

Calcoliamo ora la velocità del suono nell' alcool deducendola dal coefficiente di compressibilità, che è stato determinato dal Grassi e dal Jamin alle temperature di 0^0, $7^0,3$, $13^0,1$ e 14^0.

Rispetto alla densità dell' alcool a 0^0 i fisici sono di-

scordi; imperocchè, secondo Pierre, è 0,810, secondo Kopp 0,815 e in altre tavole si trovano numeri alquanto diversi.

Prendiamo il valore trovato dal Pierre e calcoliamo la densità dell' alcool alle temperature suddette. Essendo il coefficiente di dilatazione dell'alcool 0,00104863, si avrà:

a $7^0.3$ . . . . . $d = 0,803$
» 13 .1 . . . . . » $= 9,799$
» 14 .0 . . . . . » $= 0,798$.

I coefficienti di compressibilità dell' alcool sono:

a $7^0.3$ . . . . $c = 0,0000828$ (Grassi)
» 13 .1 . . . . » $= 0,0000904$ (id.)
» 0 .0 . . . . $c = 0,0000835$ (Jamin)
» 14 .0 . . . . » $= 0,0000911$ (id.) .

Sostituendo adunque i dati numerici nella formula

$$v = \sqrt{\frac{0,76 \times \Delta \times g}{c \times d}},$$

avremo le velocità richieste, i cui valori porremo a riscontro con quelli ottenuti mediante il suono.

Velocità ottenuta col suono		Velocità dedotta dalla compress.tà	
Temperatura	Valore di v	Temperatura	Valore di v
3°.5	$1278^m,8$	0°.0	1224^m Jamin
8 .4	1263 ,5	7 .3	1234 Grassi
13 .2	1243 ,0	13 .1	1184 Grassi
18 .4	1241 ,0	14 .0	1180 Jamin

La differenza più forte è di 61^m e la più piccola, che corrisponde alle temperature di $8^0.4$ e $7^0.3$, non giunge a 30^m. Notiamo intanto che non v'è perfetta concordanza fra i numeri trovati dal Grassi e quelli trovati dal Jamin, essendo questi ultimi un po' maggiori. Ma, a parte ciò, ritengo che la causa principale delle differenze dipenda dal non essere perfettamente anidro l'alcool da me adoperato. L'esperienza a $8^0.4$ fu fatta con dell' alcool appena giunto da una distilleria tedesca; nelle esperienze successive, benchè avessi cura di rinnovare il liquido, chi me lo forniva non poteva darmene sempre *del fresco*, e quindi soggiornando nei magazzini, se anche ben chiuso, qualche traccia d'acqua doveva assorbire.

Che anche pochissima acqua possa alterare la compressibilità, e quindi la velocità del suono, me lo dimostrò il fatto seguente. Ripetendo più volte gli esperimenti collo stesso alcool e cogli stessi tubi, risultavano via via dei suoni più acuti; e ciò doveva avvenire, imperocchè l'alcool travasandosi lungo le pareti dei tubi doveva offrire una larga evaporazione della parte più volatile, e quindi un assorbimento di vapore acqueo non trascurabile per gli effetti della compressibilità.

Velocità del suono nell' etere solforico.

A causa della grande volatilità dell' etere, dovetti contentarmi, per rendere meno incomodo l'esperimento, di farlo a bassa temperatura. Nulladimeno l' evaporazione dell' etere era così abbondante che, raffreddandosi il tubo assai al disotto dell' ambiente, fui costretto a sperimentare col termometro sempre immerso, e quindi, perchè la diminuzione della massa liquida fosse trascurabile, o quasi, dovetti limitare l' esperimento al solo tubo B.

Temperat. dell'ambiente 3°.5		Densità dell' etere 0,7325	
	Temperatura del liquido	Lunghezza della corda	Velocità
Tubo B = 0^m,50	— 1°.9	218^{mm}	1174^m,3
» »	— 3 .1	215	1190 ,7

La differenza di velocità, fra le due temperature, è di 14°.5 per 1°; sicchè trattandosi qui di limiti molto ristretti, si potrà calcolare la velocità a 0°, sottraendo 29^m dalla velocità trovata a — 1°.9 e risulterebbero 1145^m,3.

Il coefficiente di compressibilità determinato col piezometro alla temperatura di 0°, è:

0,000111 (Grassi),
0,000109 (Jamin).

Perciò, sostituiti questi valori nella formula e presa la densità a 0°, eguale a 0,737, si trova

col coefficiente di Grassi $v = 1112^m$
» » » Jamin » = 1124 .

Velocità del suono nell' essenza di trementina del commercio.

Con questo liquido si fecero tre serie di esperimenti coi tubi di ottone, e una coi tubi di vetro mediante il confronto fra i suoni prodotti dall' acqua e dall' olio di trementina.

Lunghezza del tubo	Temperatura	Densità	Lunghezza della corda	Velocità del suono	Medie
A = 0^{m}60	3°.5	0,878	226^{mm},5	1356^m,3	1372^m,1
B = 0 ,50			188 ,5	1358 ,0	
C = 0 ,40			148 ,5	1379 ,1	
D = 0 ,30			110 ,0	1396 ,3	
B = 0^m,50	18°.3	Fu dimenticato di registrarla	192^{mm},5	1329^m,7	1346^m,9
C = 0 ,40			151 ,5	1351 ,7	
D = 0 ,30			113 ,0	1359 ,3	
A = 0^m,60	29°.0	0,867	234^{mm},5	1309^m,4	1321^m,2
B = 0 ,50			195 ,0	1312 ,8	
C = 0 ,40			155 ,0	1321 ,2	
D = 0 ,30			114 ,5	1341 ,5	

Le esperienze coi tubi di vetro si fecero alla temperatura di 3^0.5 coi seguenti risultati:

Essenza di trementina.

Tubo $a = 746^{mm}$ . . . . . $l = 229^{mm},0$
» $d = 460$ . . . . . » = 152 ,5

Acqua.

Tubo $a = 746^{mm}$ . . . . . $l = 222^{mm},0$
» $d = 460$ . . . . . » = 145 ,5.

La temperatura alla quale si è fatta l'esperienza essendo vicinissima ai 4^0, e tutti gli sperimentatori concordando, quasi, nello stesso numero, per il coefficiente di compressibilità dell' acqua alla detta temperatura, si potrà prendere,

per termine di confronto, la velocità che risulta dalla formula che è di 1425^m. Dalla formula

$$v = \frac{1425 \times l}{l_1}$$

si avrà:

per $a = 746^{mm}$ . . . . . $v = 1381^{mm},4$
» $d = 460$ . . . . . » $= 1359\ ,5$

media $1370\ ,4$.

Il coefficiente di compressibilità dell' olio di trementina è stato determinato da Colladon e Sturm (1) e da Quincke (2).

I due primi fisici effettuarono la determinazione a 0^0 e trovarono 69,7 milionesimi, al qual numero aggiunsero 3,3 milionesimi quale correzione dovuta al contrarsi del vetro. Ma è noto, in seguito alle ricerche del Wertheim (3), che siffatta correzione è troppo grande, e per avere la correzione vera bisogna prendere la terza parte, cioè 1,1; quindi il coefficiente richiesto è eguale a 0,00000708.

Quincke ha trovato il coefficiente di compressibilità a $0^0 = 0,000005817$ e a $18^0.6 = 0,000007793$. Per usar della formula conviene sapere la densità dell' olio di trementina a 0^0, sul qual dato i fisici sono molto discordi, trovandosi in alcune tavole 0,864, in altre 0,869 e 0,872. Prendendo adunque 0,868, che è il valore medio, e calcolando con siffatti dati la velocità del suono a 0^0, si avrà:

secondo Colladon e Sturm $v = 1285^m$
» Quincke » $= 1416$.

(1) Vedi Memoria citata.

(2) *Annalen der Physik und Chemie.* Anno 1883, vol. 19, p. 401.

(3) *Annales de Chimie et de Physique,* 3.me serie, t. 23.

Il numero da me trovato a $0^0.5$ si approssima molto a quello di Quincke; anzi, poichè Quincke dice che il coefficiente di compressibilità a t^0 può aversi mediante la relazione

$$c_t = c_0 (1 + mt) ,$$

dove m è una costante propria a ciascun liquido, essendo per l'olio di trementina $m = 0,0183$, si avrebbe a $3^0.5$.

$$C_{3,5} = 58,17(1 + 0,0183 \times 3,5) = 61,89 .$$

E corretta la densità, che a $3^0.5$ risulterebbe eguale a 0,865, si ha, per la velocità del suono colla formula, 1375^m.

La velocità trovata col suono può dirsi, in questo caso, identica con quella che risulta dalla compressibilità misurata da Quincke. Ma sotto le temperature di $18^0.3$ e $18^0.6$ i due valori non sono altrettanto concordanti, imperocchè la velocità dedotta dalla formula è di 1235^m, con una differenza di 111^m rispetto alla velocità calcolata col suono. Avvertiamo, per altro, che siffatta differenza proviene, in parte, dal non essere l'olio di trementina, adoperato alla detta temperatura, così puro come quello che servì alla temperatura di $3^0.5$ che era d'altra provenienza. E ciò emerge anche dall'esame delle densità, le quali calcolate a $18^0.3$ e 29^0 dovrebbero risultare eguali a 0,853 e 0,846.

Velocità del suono nel petrolio del Caucaso.

Dall'Ufficio municipale per la pubblica illuminazione ebbi un campione di petrolio del Caucaso, genuino, col quale feci vari esperimenti e fra gli altri quello dei suoni. Ebbi coi tubi C, D, E i seguenti risultati; gli altri tubi non vollero sonare.

Temperatura $7^{\circ}.4$		Densità 0,828	
Tubo C	$= 0^{m},40$	$l = 148^{mm}$	$v = 1383^{m}$
» D	$= 0\ ,30$	$» = 109$	$» = 1409$
» E	$= 0\ ,20$	$» = 73,5$	$» = 1393$
		media	1395.

Quincke ha trovato che la compressibilità del petrolio a 0^{0}, è 64,99 milionesimi; calcolando la compressibilità a $7^{0}.4$ si ha:

$$c_{7,4} = 64,99\ (1 + 0,007607 \times 7,4) = 68,64.$$

Con questo dato, introdotto nella formula, risulta $v = 1349^{m}$.

Suoni colle soluzioni di gaz ammoniaco nell' acqua.

Colladon e Sturm riscontrarono che i gas disciolti nell'acqua ne diminuiscono la compressibilità in luogo di accrescerla, come parrebbe, a prima vista, dovesse avvenire. Ho voluto riconoscere se, mediante i suoni, si verificava siffatta legge; a questo fine disciolsi nell'acqua dell'anidride carbonica e confrontai i suoni ottenuti della detta soluzione, con quelli che dava l' acqua ordinaria. Il gas disciolto essendo in troppo piccola quantità, non mi fu possibile di constatare differenze sensibili, perciò divisai di adoperare un gas molto più solubile qual è il gas ammoniaco.

In siffatte esperienze non era possibile fare uso dei tubi d' ottone a motivo della energica azione chimica che l' ammoniaca ha sul rame. Perciò limitai gli esperimenti ai tubi di vetro, che furono muniti di piastre di zinco in luogo che di ottone, ma però con fori di egual diametro ($2^{mm},5$). I tubi adoperati furon quelli distinti colle lettere *b* e *c* e ad essi aggiunsi un tubo di 460^{mm}, del diametro dei precedenti,

cioè di 30^{mm}. I confronti si fecero con due soluzioni aventi un grado diverso di concentrazione, le quali si ottennero facendo direttamente sciogliere il gas ammoniaco nell'acqua distillata.

Ecco i numeri ottenuti sia coll'acqua, sia colle soluzioni ammoniacali.

Liquidi	Lunghezza del tubo	Temperatura	Densità	Lunghezza della corda
Acqua pura . . .	$b = 649^{mm}$ $c = 546$ $d = 460$	16°.4	0,998	195^{mm},2 169 ,5 145 ,0
1.ª soluzione . .	$b = 649^{mm}$ $c = 546$ $d = 460$	17°.0	0,989	194^{mm},5 169 ,0 144 ,0
2.ª soluzione . .	$b = 649^{mm}$ $c = 546$ $d = 460$	17°.0	0,972	190^{mm},0 166 ,5 141 ,8

I suoni più acuti, dati dalla 2.ª soluzione in confronto della 1.ª e dell'acqua, confermano il fatto osservato da Colladon e Sturm.

Suoni dei miscugli alcoolici.

Negli esperimenti coll'alcool ebbi modo di riconoscere che le piccole quantità di acqua assorbita dall'alcool, durante un'esperienza, bastavano per inacutire il suono e quindi diminuire la compressibilità del liquido. Pensai al-

lora che, facendo delle miscele di alcool e d' acqua, doveva risultare una compressibilità intermedia a quella dei due liquidi.

Per provare il fatto si fecero gli esperimenti con tre miscugli preparati nel modo seguente:

1.° MISCUGLIO acqua pura litri 5, alcool 250^{cc}
2.° MISCUGLIO » » » 5 » 500^{cc}
3.° MISCUGLIO » » » 5 » 750^{cc}.

I suoni prodotti tanto coll' acqua pura, quanto coi miscugli, furono i seguenti:

Acqua — Temperatura 5^{0}.

Tubo	B = 0^{m},50	l = 180^{mm},0
»	C = 0 ,40	» = 149 ,0
»	D = 0 ,30	» = 108 ,5
»	E = 0 ,20	» = 72 ,5

1. *Miscuglio — Temp.* 5^{0}.8.

Tubo	B = 0^{m},50	l = suono incerto
»	C = 0 ,40	» = 145^{mm},3
»	D = 0 ,30	» = 106 ,2

2.° *Miscuglio — Temp.* 5^{0}.1.

Tubo	B = 0^{m},50	l = 173^{mm},0
»	C = 0 ,40	» = 142 ,5
»	D = 0 ,30	» = 103 ,5
»	E = 0 ,20	» = 69 ,5

3.° *Miscuglio — Temp.* 4^{0}.4.

Tubo	B = 0^{m},50	l = 170^{mm},0
»	C = 0 ,40	» = 139 ,5
»	D = 0 ,30	» = 101 ,5
»	F = 0 ,20	» = 68 ,5

(*NB.* Dei suoni dati dal tubo *E* non bisogna fare gran conto, perchè troppo acuti e perciò di non facile valutazione).

I numeri trovati dimostrano, che quanto è maggiore la quantità d'acqua disciolta, tanto più acuto è il suono, e quindi è minore la compressibilità.

Siffatto risultamento mi aveva dapprima sorpreso, ma dopo alcuni mesi che furono fatti i detti esperimenti, lessi, in una accurata Memoria dei signori Pagliani e Palazzo (1), che i miscugli alcoolici si comportano appunto nel modo indicato dai suoni, cioè che la compressibilità diminuisce col crescere della quantità d'alcool disciolta. La diminuzione ha però un limite, al di là del quale la compressibilità della miscela comincia a crescere, riapparisce eguale a quella dell'acqua, e poi continua ad aumentare. Si vegga su questo proposito la interessante Memoria citata.

Calcolando la velocità del suono, nel miscuglio n.° 3, si trova

col tubo B	. . . . .	$v = 1505^m,8$
» » C	. . . . .	» $= 1468\ ,1$
» » D	. . . . .	» $= 1513\ ,2$
		media $1495^m,7$

Nella Memoria dei sigg. Pagliani e Palazzo troviamo, che il miscuglio alcoolico n.° 2 contiene l'11,38 per 100, in peso, d'alcool per 100 parti di miscela. La nostra soluzione n.° 3, contenendo in volume 750^{cm^3} d'alcool mescolati con 5000^{cm^3} d'acqua ha, in peso, 10,9 di alcool su 100 parti di miscuglio alla temperatura di 4°.4. Cotali miscele sono

(1) *Sulla compressibilità dei miscugli di alcool etilico ed acqua.* — Atti della R. Accademia delle scienze di Torino, vol. 19, adunanza del 15 giugno 1884.

adunque molto vicine; perciò calcolando la velocità del suono corrispondente alla soluzione n.° 2 dei sigg. Pagliani e Palazzo, sostituiremo nella formula i valori di c e d trovati dai detti fisici alla temperatura di 0^0, per essere la più vicina alla nostra. Dalla citata Memoria ricaviamo

$$c = 0{,}0000431$$
$$d = 0{,}9837 \,.$$

Con questi dati risulta

$$v = 1545^m.$$

I valori, come apparisce, sono molto prossimi, e la differenza, che non giunge ai 50^m, dipende principalmente dall' essere la miscela n.° 2 più ricca di alcool della nostra. E poichè cotal miscela sta nella serie discendente studiata dai detti fisici, deve avere un minor grado di compressibilità.

Suoni prodotti dalle soluzioni saline.

Le esperienze fatte dal Grassi sulla compressibilità dei liquidi, dimostrano che, sciogliendo un qualche sale nell'acqua, ne risulta un minor grado di compressibilità. Ho voluto riconoscere se questa legge poteva essere dimostrata mediante la maggiore o minore altezza dei suoni dati da soluzioni più o meno concentrate; a questo fine feci dapprima degli esperimenti su varie soluzioni di cloruro sodico che si facevano vibrare nei tubi di vetro ovvero nei tubi di ottone.

Per i tubi di vetro a, b, c si ebbero i seguenti risultati:

Acqua dolce — Temperatura $4^0.4$.

Tubo	$a = 746^{mm}$	. . . . .	$l = 225^{mm},6$
»	$b = 649$	. . . . .	» $= 197\ ,7$
»	$c = 546$	. . . . .	» $= 172\ ,8$

1.ª *soluzione.*

Densità (al densimetro) 1,066 — Temp. 3°.9.

Tubo	$a = 746^{mm}$	. . . . .	$l = 218^{mm},4$
»	$b = 649$	. . . . .	» $= 188\ ,0$
»	$e = 546$	. . . . .	» $= 166\ ,2$

2.ª *soluzione.*

Densità (al densimetro) 1,120 — Temp. 4°.5.

Tubo	$a = 746^{mm}$	. . . . .	$l = 208^{mm},5$
»	$b = 649$	. . . . .	» $= 184,\ 0$
»	$c = 546$	. . . . .	» $= 162\ ,0$

3.ª *soluzione.*

Densità (al densimetro) 1,203 — Temp. 5°.2.

Tubo	$a = 746^{mm}$	. . . . .	$l = 201^{mm},3$
»	$b = 649$	. . . . .	» $= 180\ ,0$
»	$c = 546$	. . . . .	» $= 159\ ,4$

Con tubi d'ottone si sono fatte delle sperienze colle soluzioni n.° 2 e n.° 3 deducendone pure la velocità del suono.

2.ª *soluzione — Temperatura* 4°.6.

Tubo	$B = 0^{m},50$	. . .	$l = 175^{mm}$	. .	$v = 1462^{m},8$
»	$C = 0\ ,40$	. . .	» $= 140$	. .	» $= 1462\ ,8$
»	$D = 0\ ,30$	. . .	» $= 101\ ,5$	. .	» $= 1513\ ,0$

media $1479^{m},5$

3.ª *soluzione — Temp.* 4°.6.

Tubo	$B = 0^{m},50$	. . .	$l = 170^{mm}$	. . .	$v = 1506^{m},0$
»	$C = 0\ ,40$	. . .	» $= 133\ ,5$	. . .	» $= 1533\ ,6$
»	$D = 0\ ,30$	. . .	» $= 98\ ,5$	. . .	» $= 1559\ ,3$

media $1532^{m},9$

Confermato in tal modo il fatto che la compressibilità dell' acqua diminuisce quando vi è disciolto un sale, mi parve opportuno di studiare se i sali disciolti esercitano tutti la stessa azione, ovvero se questa è diversa sia a parità di concentrazione, ovvero a parità di peso.

Qualche tentativo per istudiare la diversa azione dei sali venne fatto dal Grassi nelle sue ricerche sulla compressibilità delle soluzioni saline (1), ma non condusse a soddisfacenti conclusioni. Per eseguire, mediante lo studio dei suoni, siffatto confronto, non occorre determinare la velocità; basta valutare i suoni che appariscono in tubi della stessa lunghezza e confrontarli; i più acuti indicheranno un minor grado di compressibilità. Per tali esperienze credetti conveniente l' adoperare i tubi di vetro, già descritti, perchè, essendo assai lunghi, davano dei suoni gravi e quindi era più facile valutare, nei segmenti della corda, le differenze fra suono e suono.

Avendo già in pronto alcune soluzioni di sali diversi, presso a poco allo stesso grado di concentrazione, feci un primo studio preliminare di cui espongo i risultati.

(1) Vedi Memoria citata.

Tavola I.

Nome della soluzione	Densità	Temperatura	Lunghezza del tubo	Lunghezza della corda
Cloruro di sodio	1,067	12°.5	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$217^{mm},7$ 187 ,0 167 ,0
Cloruro di calcio	1,065	12°.1	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$218^{mm},5$ 186 ,5 167 ,0
Solfato di sodio	1,063	11°.5	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	216^{mm} 185 167
Nitrato di potassio	1,062	13°.4	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$221^{mm},5$ 189 ,0 168 ,0
Solfato di zinco	1,069	12°.2	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	218^{mm} 190 167

Dalle diverse lunghezze della corda apparisce, che la soluzione meno compressibile è quella del solfato di sodio e le più compressibili sono quelle del nitrato di potassio e del solfato di zinco. Ma tali osservazioni preliminari hanno poco valore, imperocchè il grado di concentrazione non è lo stesso per tutte, e poi, avendolo determinato col densimetro, non potevano risultare numeri troppo esatti.

Risolsi adunque di prendere come tipo una data soluzione, determinarne la densità colla bilancia, indi ridurre le altre soluzioni allo stesso grado di concentrazione, procurando di ottenere un' eguale spinta sopra una sfera di vetro in esse immersa. La soluzione presa come tipo fu quella del cloruro di calcio, la cui densità, a 17.°3, corrispondeva a 1,1059.

Tavola II.

Nome della soluzione	Temperatura	Lunghezza del tubo	Lunghezza della corda
Cloruro di calcio	17°.3	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$207^{mm},6$ 183 ,3 161 ,6
Solfato di sodio	17°.5	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$203^{mm},5$ 179 ,4 159 ,3
Cloruro di sodio	17°.4	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$205^{mm},5$ 180 ,5 159 ,0
Solfato di zinco	17°.4	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$211^{mm},8$ 186 ,5 164 ,5
Nitrato di potassio	20°.6	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$209^{mm},2$ 184 ,6 163 ,0

Tali risultamenti mostrano, che le varie soluzioni saline, portate allo stesso grado di concentrazione, danno suoni diversi; i più acuti corrispondono al solfato di sodio e i più gravi al solfato di zinco. Perciò la soluzione di solfato sodico è più compressibile di quella del solfato di zinco. La qual cosa avviene perchè i sali adoperati, essendo diversamente densi, si sciolgono in quantità diverse per avere lo stesso grado di concentrazione; per il solfato di zinco, assai più pesante del solfato sodico, occorre minor quantità di sale per raggiungere la stessa densità.

Proseguendo i confronti, passai a sperimentare con delle soluzioni che contenevano lo stesso peso di sale disciolto in una quantità determinata d'acqua. Incominciai dapprima con soluzioni leggiere ottenute disciogliendo 250 parti di sale in 1000 parti d' acqua.

Tavola III.

Qualità della soluzione	Temperatura	Densità	Lunghezza del tubo	Lunghezza della corda
Solfato di ferro	20°.7	1,1154	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$214^{mm},3$ 189 ,4 170 ,6
Solfato di zinco	20°.2	1,1251	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$218^{mm},3$ 190 ,5 169 ,0
Cloruro di sodio	20°.8	1,1382	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$198^{mm},5$ 174 ,0 156 ,5
Cloruro di calcio	20°.4	1,1267	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$206^{mm},2$ 183 ,2 160 ,7
Nitrato di potassio	19°.8	1,1359	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$209^{mm},4$ 184 ,7 164 ,2
Cloruro di ammonio (1)	20°.0	1,0586	$a = 746^{mm}$ $b = 649$ $c = 546$	$205^{mm},5$ 182 ,5 161 ,8

(1) Esperienze fatte colle piastre di zinco.

Si spinsero poscia alcune delle dette soluzioni ad un maggior grado di concentrazione, e in altre, che si trovavano prossime al punto di saturazione, non si potè conser-

vare una perfetta eguaglianza nella quantità di sale che si discioglieva in una medesima quantità d'acqua. Nulladimeno anche questi risultamenti meritano di essere registrati.

Tavola IV.

Qualità della soluzione	Temperatura	Densità	Lunghezza del tubo	Lunghezza della corda
Solfato di zinco 40 parti di sale e 100 d' acqua	22°.0	1,1898	$a = 746^{mm}$ $b = 546$ $c = 460$	$205^{mm},5$ 162 ,8 136 ,5
Cloruro di calcio 39,7 parti di sale e 100 d' acqua	23°.6	1,2489	$a = 746^{mm}$ $b = 546$ $c = 460$	$199^{mm},6$ 156 ,3 131 ,5
Cloruro di sodio 37,8 parti di sale e 100 d' acqua	26°.4	1,2043	$a = 746^{mm}$ $b = 546$ $c = 460$	$190^{mm},2$ 150 ,4 125 ,9
Nitrato di potassio 38,6 parti di sale e 100 d' acqua	26°.6	1,2000	$a = 746^{mm}$ $b = 546$ $c = 460$	$203^{mm},5$ 159 ,5 134 ,7

Poniamo per un momento in disparte, nelle tavole III e IV, il solfato di ferro e il solfato di zinco, che hanno, ciascuno, sette molecole d'acqua di combinazione, e facciamo i confronti fra gli altri sali anidri. Dal confronto apparisce, che i detti sali non si contengono nello stesso modo; imperocchè, disciolti in parti eguali, o quasi, in una stessa quantità di acqua, ne modificano diversamente la compressibilità. La soluzione meno compressibile è quella del *clo-*

ruro sodico, e la più compressibile è quella del nitrato potassico; perchè alla prima corrispondono suoni più acuti che alla seconda. Se poi consideriamo tutte insieme le soluzioni, vediamo che la più compressibile è quella del *solfato di zinco*. Ma poichè questo sale ha per formula

$$ZnSO^4 + 7H^2O,$$

potrebbe attribuirsi la sua maggiore compressibilità all'essere meno ricco di sale anidro degli altri considerati. Nulladimeno osservando che, colla sostituzione dei pesi atomici nella formula, risulta che sopra 287,2 parti di sale idrato ve ne sono 126 d'acqua, si ha, con una semplice proporzione, che in 100 parti di sale idrato ve n'hanno 56,13 di anidro, quindi nella soluzione della tavola IV si trovano 22,452 parti di sale anidro per 100 parti d'acqua, vale a dire il 22 ½ p. % circa.

Confrontando il suono dato da questa soluzione con quelli dati dal *cloruro sodico* e dal *nitrato potassico*, sciolti nella proporzione del 25 p. %, troviamo che il suono del *solfato di zinco* è più grave di quello del cloruro di sodio, e più acuto di quello del nitrato di potassio: altra prova che fa vedere come i sali non si contengono nello stesso modo rispetto alla compressibilità delle loro soluzioni.

Colle soluzioni indicate nella tavola IV produssi i suoni nei tubi d'ottone, affine di determinarne la velocità di propagazione come si fece per altri liquidi. Alle dette soluzioni se ne aggiunsero altre due, una di *solfato sodico* e altra di *nitrato sodico*, e fu rinforzata la soluzione di solfato di zinco fino a contenere 50 parti di sale per 100 parti di acqua.

Tavola V.

Qualità della soluzione	Temperatura	Densità	Lungh. del tubo	Lungh. della corda	Velocità del suono	Medie
			B = 0^m,50	164^{mm},5	1556^m,2	
Cloruro di sodio	25°.5	1,2043	C = 0 ,40	133 ,0	1539 ,8	1573^m,8
			D = 0 ,30	94 ,5	1625 ,4	
			B = 0^m,50	167^{mm},5	1528^m,3	
Nitrato di sodio	26°.3	1,3558	C = 0 ,40	134 ,5	1522 ,4	1552^m,9
			D = 0 ,30	95 ,5	1608 ,0	
			B = 0^m,50	169^{mm},0	1514^m,7	
Solfato di sodio	26°.6	1,1381	C = 0 ,40	135 ,0	1516 ,9	1538^m,3
			D = 0 ,30	97 ,0	1583 ,4	
			B = 0^m,50	170^{mm},25	1503^m,6	
Solfato di zinco	26°.2	. . . .	C = 0 ,40	136 ,5	1500 ,3	1526^m,4
			D = 0 ,30	97 ,5	1575 .3	
			B = 0^m,50	171^{mm},0	1497^m,0	
Nitrato di potassio	25°.7	1,1930	C = 0 ,40	139 ,0	1473 ,3	1504^m,6
			D = 0 ,30	99 ,5	1543 ,6	

Lasciate in disparte le dette soluzioni, divisai di riprendere gli esperimenti, quando la temperatura fosse divenuta più bassa, affine di averle compiutamente sature. Infatti ripresi le esperienze nella stagione invernale, e trovai precipitata, tanto per evaporazione, quanto per l'abbassamento di temperatura, una certa quantità di sale; perciò filtrata l'acqua madre di ciascuna soluzione sull'eccesso del sale precipitato, produssi nuovamente i suoni per avere le velocità corrispondenti al punto di saturazione.

Tavola VI.

Qualità della soluzione	Temperatura	Densità	Lungh. del tubo	Lungh. della corda	Velocità del suono	Medie
Cloruro di sodio	3°.7	1,2114	B = 0m,50	165mm,0	1551m,5	1564m,9
			C = 0 ,40	133 .0	1539 ,8	
			D = 0 ,30	95 ,0	1616 ,8	
			E = 0 ,20	66 ,0	1551 ,5	
Nitrato di sodio	3°.8	1,3550	B = 0m,50	168mm,5	1519m,1	1541m,2
			C = 0 ,40	135 ,6	1504 ,4	
			D = 0 ,30	96 ,0	1600 ,0	
			E = 0 ,20	suono confuso	. . . .	
Nitrato di potassio	4°.0	1,0930	B = 0m,50	174mm,5	1467m,0	1446m,0
			C = 0 ,40	144 ,0	1422 ,0	
			D = 0 ,30	105 ,0	1462 ,8	
			E = 0 ,20	71 ,5	1432 ,2	
Solfato di sodio	4°.1	1,0490	B = 0m,50	172mm,5	1484m,0	1454m,5
			C = 0 ,40	143 ,0	1432 ,0	
			D = 0 ,30	104 ,5	1469 ,9	
			E = 0 ,20	71 ,5	1432 ,2	

Si è pure provata una soluzione satura di solfato di zinco, la cui densità a 4°.5 era eguale a 1,3878, ma non si è potuto avere alcun suono nè coi tubi d' ottone nè con quelli di vetro. Con una soluzione molto concentrata di cloruro di calcio (densità 1,3086, temp.ª 4°.6), si sono ottenuti dei suoni debolissimi, e confusi, coi tubi C, D, E, e nessuno coi tubi di vetro. Avvertiamo che queste due soluzioni, specialmente quella di solfato di zinco, avevano una consistenza oltremodo oleosa.

La velocità del suono, nelle dette soluzioni, si è puranco determinata mediante il rapporto colla velocità del suono nell' acqua, come si è fatto per l' acool e per l' essenza di trementina.

Se tal modo di determinazione non fu adoperato per le soluzioni indicate nella tavola V, ciò dipese dalla elevata temperatura, la quale, essendo compresa fra i 25 e 26 gradi, non permetteva di avere un dato sicuro per fare il confronto, essendo cognita, per la misura diretta della velocità del suono nell' acqua, la sola esperienza fatta a $8^0.1$. Colle soluzioni indicate nella tavola VI avendo sperimentato a temperature poco discoste dai 4^0, per fare il confronto si potrebbe prendere, senza forte errore, il numero 1435 trovato colla esperienza diretta. Ma poichè i vari sperimentatori, che hanno determinato la compressibilità dell'acqua a temperature prossime al suo massimo di densità, si accordano tutti in un valore pressochè eguale a 5 milionesimi, così sostituendo questo dato nella formula

$$\sqrt{\frac{g \times 0{,}76 \times \Delta}{c \times d}},$$

poichè $d = 1$, risulta $v = 1425^m$, come abbiam detto altra volta.

Si può prendere adunque siffatto numero per misurare la velocità, mediante la proporzione fra il numero delle vibrazioni corrispondente al suono dell' acqua, e quello corrispondente alla soluzione a parità di lunghezza del cilindro liquido vibrante. Ecco i risultati ottenuti coi tubi *a* e *d* essendosi rotti gli altri due tubi.

Tavola VII.

Qualità della soluzione	Temperatura	Densità	Lungh. del tubo	Lunghezza della corda l	Lunghezza della corda l'	$\frac{1425^m \times l}{l'}$	Medie
Acqua	4°.4		$a = 746^{mm}$	223 mm ,0			
			$d = 460$	145 ,5			
Cloruro di sodio	3°.5	1,2114	$a = 746^{mm}$		193mm,5	1642m,2	1630m,9
			$d = 460$		128 ,0	1619 ,7	
Nitrato di sodio	3°.2	1,3550	$a = 746^{mm}$		195mm,5	1625m,4	1613m,2
			$d = 460$		129 ,5	1601 ,0	
Solfato di sodio	4°.1	1,049	$a = 746^{mm}$		216mm,0	1471m,0	1468m,1
			$d = 460$		141 ,5	1465 ,2	
Nitrato di potassio	4°.3	1,093	$a = 746^{mm}$		217mm,5	1461m,0	1460m,5
			$d = 460$		142 ,0	1460 ,0	

Poichè il Wertheim ed il Grassi avevano sperimentato con soluzioni concentrate, ma sotto temperature più alte delle nostre, divisai di fare un' ultima serie di esperimenti, aspettando che la temperatura dell'ambiente si fosse elevata, e nel frattempo procurai di mantenere sature le soluzioni coll'aggiunta di sale. Non volli però raggiungere una temperatura tanto alta, per non discostarmi di troppo da quella di 8°.1, sotto la quale fu fatta l'esperienza di Colladon e Sturm: e ciò coll' intendimento di prendere anche il numero 1435 per termine di confronto nella determinazione della velocità del suono nelle dette soluzioni.

Tavola VIII.

Qualità della soluzione	Temperatura	Densità	Lungh. del tubo	Lungh. della corda	Velocità del suono	Medie
Cloruro di sodio	14°.7	1,2080	B = 0m,50	163mm,5	1554m,5	1580m,5
			C = 0 ,40	131 ,5	1556 ,8	
			D = 0 ,30	94 ,8	1620 ,0	
			E = 0 ,20	suono confuso	. . . . .	
Nitrato di sodio	15°.3	1,3629	B = 0m,50	164mm,7	1554m,3	1570m,3
			C = 0 ,40	133 ,5	1534 ,0	
			D = 0 ,30	95 ,5	1608 ,0	
			E = 0 ,20	65 .0	1575 ,2	
Solfato di sodio	14°.7	1,0727	B = 0m.50	169mm,0	1514m,8	1506m,0
			C = 0 ,40	138 ,5	1478 ,6	
			D = 0 ,30	100 .0	1536 ,0	
			E = 0 ,20	68 ,5	1494 ,8	
Nitrato di potassio	14°.4	1,1161	B = 0m,50	171mm,0	1497m,0	1485m,3
			C = 0 ,40	140 ,5	1457 ,6	
			D = 0 ,30	101 ,5	1513 ,2	
			E = 0 ,20	69 ,5	1473 ,3	

Colle stesse soluzioni si produssero i suoni nei tubi di vetro coi seguenti risultati.

Tavola IX.

Qualità della soluzione	Temperatura	Lungh. del tubo	Lunghezza della corda l	Lunghezza della corda l'	$\frac{1435^m \times l}{l'}$	Medie
Acqua	13°.8	$a = 746^{mm}$	$218^{mm},0$			
		$d = 460$	143 ,5			
Cloruro di sodio	14°.7	$a = 746^{mm}$		$191^{mm},5$	$1638^m,6$	$1636^m,4$
		$d = 460$		126 ,0	1634 ,3	
Nitrato di sodio	15°.3	$a = 746^{mm}$		$192^{mm},5$	$1625^m,0$	$1623^m,2$
		$d = 460$		127 ,0	1621 ,4	
Solfato di sodio	14°.7	$a = 746^{mm}$		$208^{mm},0$	$1500^m,4$	$1501^m,7$
		$d = 460$		137 ,0	1503 ,0	
Nitrato di potass.	14°.4	$a = 746^{mm}$		$209^{mm},5$	$1493^m,2$	$1490^m,0$
		$d = 460$		138 ,5	1486 ,8	

Le differenze di velocità nel cloruro di sodio, dentro i limiti di temperatura, sotto i quali abbiamo sperimentato, appariscono piccole perchè la solubilità di questo sale cresce ben poco colla temperatura. Le differenze sono più notabili specialmente negli ultimi due sali, che si sciolgono in maggior copia col crescere della temperatura. È però da osservare, che le velocità determinate colla formola $\frac{v \times l}{l'}$ debbono essere inferiori al vero, perchè, crescendo la temperatura, cresce pur anco la velocità del suono nell'acqua, come apparisce anche dai suoni. Per effettuare la misura con maggiore esattezza si potrà prendere, per l'acqua, la velocità risultante dalla compressibilità fra i 13° e i 14°, la

quale è di 1458^m, come apparisce dalle esperienze del Grassi e del Quincke [1]. Con siffatto dato si avranno i seguenti numeri per le soluzioni sperimentate.

Cloruro di sodio.

Col tubo *a*	$v = 1660^m,8$	
» » *d*	» $= 1660\ ,5$	
media	$1660^m,6$	

Nitrato di sodio.

Col tubo *a*	$v = 1652^m,1$	
» » *d*	» $= 1647\ ,4$	
media	$1649^m,7$	

Solfato di sodio.

Col tubo *a*	$v = 1529^m,0$	
» » *d*	» $= 1527\ ,1$	
media	$1528^m,0$	

Nitrato di potassio.

Col tubo *a*	$v = 1518^m,1$	
» » *d*	» $= 1510\ ,6$	
media	$1514^m,3$	

Da tutto l' insieme dei risultamenti si rende manifesto

(1) Il valore del coefficiente di compressibilità dell' acqua a 13°.4 è, secondo Grassi, 47,7 ; colla temperatura di 14°. il Quincke trova 47,3.

che, nelle soluzioni saline, la maggiore influenza sulla velocità del suono nell' acqua viene esercitata dal cloruro di sodio, e ciò apparisce pure dalle esperienze del Grassi. Il chiarissimo fisico, calcolando la velocità mediante la compressibilità, ch'egli avea trovata col piezometro, ebbe i seguenti numeri:

Cloruro di sodio a 18°.5 (densità 1,1226) . . $v = 1676^m,6$
id. id. a 18°.1 (» 1,2024) . . » $= 1812\ ,4$
Nitrato di Sodio a 18°.1 (» 1,2026) . . » $= 1690\ ,0$

E il Wertheim, per la velocità delle dette soluzioni, moltiplicata per $\sqrt{\frac{3}{2}}$, trovò i seguenti risultati:

Cloruro di sodio a 18° (densità 1,1920) . . $v = 1561^m,6$
Nitrato di sodio a 20°.9 (» 1,2066) . . » $= 1669\ ,9$

PARTE III.

Esame delle cause che possono influenzare i fenomeni testè descritti. — Confronti e conclusioni.

I.

Innanzi di riassumere i vari risultamenti ottenuti colle esperienze sopra descritte, sembrami opportuno lo esporre alcuni esperimenti fatti allo scopo di rispondere ad un dubbio, sortomi in mente durante lo studio dei suoni prodotti dall' efflusso dei liquidi.

Il dubbio di cui parlo era grave, imperocchè si trattava di provare, se il liquido partecipava alle vibrazioni, ovvero se il suono udito fosse unicamente dovuto alle vibrazioni longitudinali delle pareti, e il liquido operasse soltanto a guisa di freno, rendendo il suono più grave o più acuto, a seconda del maggiore o minor grado di densità.

In parte le esperienze già descritte rispondono in favore delle vibrazioni del liquido, perchè abbiam visto che l'alcool, l'etere, l'essenza di trementina, danno suoni più gravi di quelli dati dall' acqua, laddove le soluzioni saline danno suoni più acuti. Se i detti liquidi dovessero fare quella istessa funzione, a cui serve la fasciatura metallica della grossa corda del violino, dovrebbe accadere il contrario di quanto realmente avviene. Nulladimeno ho voluto fare varie prove, che mi hanno confermato essere il liquido in istato vibratorio.

Si è presa una campana di vetro e dopo averla fissata alla stessa guisa del timbro di Savart, si è strisciata coll' arco per cavarne il suono fondamentale. Poscia vi si è versato, successivamente, uno stesso volume di liquidi di-

versi, e volta per volta si sono cavati i suoni valutandoli col sonometro.

Suono della campana:

senza liquido	$l = 233^{mm},0$
con $^1/_2$ litro d'alcool.	» $= 234\ ,5$
» $^1/_2$ litro di soluzione di $NaAzO^3$	» $= 238\ ,5$

In queste esperienze apparisce, cosa già nota, che il liquido versato nella campana rallenta le vibrazioni, e quanto più è denso, più grave è il suono ottenuto.

Si è pur fatta la seguente esperienza: si è sospeso un tubo lungo $0^m,50$, del diametro di $0^m,05$, ma le cui pareti erano più sottili di quelle del tubo B; indi si è percosso sull'orlo, prima pieno d'aria e poi pieno di acqua o di altro liquido; si sono ottenuti i seguenti suoni:

senza liquido.	$l = 170^{mm},0$
pieno d'alcool	» $= 215\ ,0$
» d'acqua	» $= 222\ ,5$
» di soluzione di $NaAzO.^3$ . .	» $= 236\ ,5$.

Questa esperienza è analoga all'altra della campana; anche in questo caso il liquido fa da freno e i suoni più gravi corrispondono ai liquidi più densi. All'incontro nei suoni per afflusso o per efflusso, il più grave è quello dell'alcool, e il più acuto quello della soluzione di nitrato sodico, perchè i detti liquidi, vibrando, danno dei suoni che dipendono dal loro grado di compressibilità.

II.

Siffatte prove parranno forse oziose, ma le credetti necessarie, perchè alcune esperienze sembravano dimostrare che le sole pareti fossero in istato vibratorio. Infatti, facendo parlare per afflusso il tubo da $0^m.50$, a pareti sot-

tili, stringendo fortemente le pareti, anche colla mano, il tubo cessava di sonare. Con questo e con altri tubi, cessava talvolta il suono, oppure era reso più debole e più grave, appoggiando sull' orlo superiore un oggetto pesante, come p. es. un martello.

Separando la piastra dal tubo e poi fissandola di nuovo alle pareti con un largo tubo di gomma, lungo da 8 a 10 centimetri, non si aveva alcun suono nè per efflusso, nè per afflusso. Questa esperienza fu già da me descritta in altra Memoria (1).

In qual modo questi esperimenti possono conciliarsi col moto vibratorio del liquido? Parmi che possa valere la seguente spiegazione. Il moto periodico della vena liquida fa vibrare la piastra; questa comunica le vibrazioni alle pareti del tubo, che a lor volta le comunicano al liquido. Siffatto modo di eccitare le vibrazioni è dunque analogo a quello tenuto dal Cagniard de Latuor, che strisciava le pareti dei tubi per far vibrare i liquidi. La differenza sta in ciò, che col metodo di Cagniard de Latour, non si poteva avere che un solo suono; qui invece, regolando l'apertura del rubinetto, si possono cavare più suoni; cioè il suono fondamentale ovvero alcuni armonici; l' uno e gli altri dipendenti dal numero delle pulsazioni della vena, che a nostra volontà facciamo variare, aprendo più o meno il rubinetto.

E che il liquido vibra lo dimostra pure un altro esperimento che fu descritto nella sopra citata Memoria. Il quale consiste nel prendere una piccola callotta, o coppella di vetro o di metallo, fissarla ad un' asta, dalla parte convessa, e immergerla nel tubo nel mentre suona. Allora si osserva, che quanto più s'immerge la coppella, il suono si fa più acuto, perchè la massa d' aria racchiusavi limita la

(1) *Atti del R. Istituto veneto,* vol. VIII, serie V.

colonna liquida vibrante, impedendo, col suo comprimersi, che le vibrazioni si trasmettano agli strati superiori del liquido. L'esperimento riesce assai meglio facendo sonare il liquido per efflusso piuttostochè per afflusso, perchè in quest' ultimo caso il getto liquido può cacciar l' aria dalla coppella e alterare il fenomeno.

III.

Nelle esperienze fatte dal Wertheim, il tubo sonoro trovavasi tutto immerso nel liquido. Ho voluto provare a far suonare un tubo per afflusso procurando che stesse immerso nel liquido e si dispose l' esperienza nel modo seguente.

Si prese un tubo di vetro del diametro interno di $0^m,07$ alto $0^m,58$ e si scelse un tappo di sughero capace di chiuderlo. Il tappo era forato, e nel foro s'introdusse la cannetta del tubo D ($0^m,30$); poscia si applicò il tappo al tubo di vetro in modo che il tubo d'ottone rimanesse nell' interno. Sospeso tutto l' apparecchio nel solito modo, si fece affluire l' acqua nel tubo d'ottone, la quale, dopo averlo riempiuto, si rovesciava nel tubo di vetro. Finchè l' acqua stette al di sotto della bocca del tubo, il suono mantenne la stessa altezza; ma quando sorpassò la bocca, il suono cominciò a calare perchè andava via via crescendo la lunghezza della colonna liquida vibrante.

Lo stesso esperimento fu ripetuto con un tubo d'ottone a imboccatura di flauto, lungo $0^m,416$ e del diametro interno di $0^m,017$, il quale, fatto parlare coll'aria, sonava il sol_3. Il tubo cominciò a dare un suono abbastanza puro quando si trovò del tutto immerso, e l' altezza a cui giungeva l' acqua nel tubo esterno di vetro non influiva, sensibilmente, sull' altezza del suono. Anche qui si aveva l'estinzione del suono, appoggiando sull'orlo superiore del tubo d' ottone una bacchetta di ferro, ovvero qualche altro og-

getto pesante. Il suono aveva lo stesso carattere di quelli ottenuti per afflusso, ma assai meno intenso. Anche in questo esperimento furono prese tutte le precauzioni perchè non rimanessero bolle d'aria. Valutato il suono col sonometro, si trovò che corrispondeva alle vibrazioni di un segmento di corda lunga $112^{mm},5$, essendo la temperatura di 12^{0}.

Il numero delle vibrazioni semplici del detto suono è $\frac{256000}{112,5} = 2275$; e poichè la lunghezza del tubo, essendo aperto, eguaglia $\frac{\lambda}{2}$, si avrà per la velocità del suono nell'acqua

$$2275 \times 0,416 = 964^{m},4.$$

Il numero trovato sta nei limiti di quelli ottenuti dal Wertheim, senza però alcuna correzione. Troviamo infatti, nella serie dei suoni registrati dal Wertheim per l'acqua, i num. 978,4 - 935,3 - 997,1 - 947,0 - 941,9 ec.... Ciò mostra che, qualora si volesse adoperare il metodo del Wertheim, purchè si seguissero le correzioni e le norme indicate dal detto fisico, potrebbesi sperimentare nel modo testè descritto, senza bisogno di un apparecchio alquanto complicato qual è quello di cui fece uso il Wertheim. Notiamo poscia che il nostro tubo E, lungo $0^{m},20$, sonando coll'acqua dava, a 8^{0}, una nota all'unisono con un segmento di corda lungo $72^{mm},5$. Il tubo, aperto a imboccatura di flauto, si comporta come due tubi chiusi di $20^{mm},5$, circa vibranti all'unisono. Si vede adunque che il suono di questi tubi è assai più grave di quello ottenuto per afflusso con un tubo di pressochè la stessa lunghezza.

Altro fatto degno di nota è il seguente: quando s'introduceva la bacchetta di ferro coll'intento di smorzare il suono, si è osservata una differenza fra il contegno del tubo a imboccatura di flauto e l'altro a piastra forata.

Col secondo tubo si otteneva l'estinzione tostochè si appoggiava la bacchetta sull'orlo; coll'altro si manifestava nella bacchetta, prima di ottenere la compiuta estinzione del suono, un certo fremito come se le pareti del tubo fossero animate da scosse trasversali. Ciò starebbe a provare, che la flessibilità delle pareti, urtate dalla massa liquida che si frange contro il labbro superiore della bocca del tubo, dà luogo a delle reazioni, che sono la causa principale dei suoni più gravi, che si ottengono col metodo di Wertheim.

Nei suoni ottenuti per afflusso, benchè più intensi di quelli che si producono coi tubi a imboccatura di flauto, il fenomeno è più calmo, e vibrando le pareti in senso longitudinale non si avvertono quei fremiti di cui abbiamo discorso. Però non è da credere che non abbia alcuna influenza la flessibilità delle pareti, la quale, anche nello scuotimento ottenuto per afflusso, è causa di abbassamento nel suono, specialmente quando le pareti sono di breve spessore. Ed invero, adoperando un tubo delle dimensioni del tubo B, cioè lungo $0^m,50$ e del diametro di $0^m,05$ e le cui pareti avevano lo spessore di circa $1/3$ di millimetro, fatto sonare coll'acqua si è cavata una nota all'unisono col segmento di corda lungo $191^{mm},5$ sotto la temperatura di $3^0.6$. Alla stessa temperatura il tubo B, le cui pareti avevano uno spessore quadruplo, dava un suono rappresentato da un segmento di corda lungo 179^{mm}.

Siffatto tubo a pareti sottili ci dette modo di fare alcuni esperimenti che non sono privi d'interesse. Oltre il suono rappresentato dal segmento di corda di $191^{mm},5$, suono debolissimo e difficile ad ottenersi, se ne aveva un altro robusto e spontaneo rappresentato da un segmento di corda lunga 231^{mm}. Ma ci accorgemmo che questo suono era unicamente dovuto alle vibrazioni trasversali delle pareti; perchè bastava appoggiare la punta di una lesina o di un compasso, per ottenere l'estinzione del suono. La qual-

cosa non avveniva per il suono debole di $191^{mm},5$; anzi, appoggiando la punta, affine di estinguere le vibrazioni trasversali, il suono si udiva più forte, e talvolta bastava l'appoggio della punta per provocare la sua apparizione.

IV.

La detta esperienza ci permise di spiegare un fatto che presentava il tubo B quando sonava coll'acqua e, talvolta, con qualche soluzione salina.

Questo tubo dava due suoni spiccatissimi e quasi egualmente intensi; uno dei detti suoni variava colla temperatura; l'altro, più grave, rimaneva quasi costante, oscillando fra i 186 e i 188 millimetri. Il primo suono era dovuto alle vibrazioni del liquido, il secondo a quelle trasversali delle pareti; perchè appoggiando la punta, il secondo suono si estingueva e il primo non subiva alcuna variazione; anzi spesse volte l'appoggio della punta bastava a far tacere il primo suono ed a fare apparire il secondo. Immergendo nel tubo la piccola callotta, poc'anzi descritta, quando il tubo dava il suono più grave, non si aveva modificazione nell'altezza; invece la si aveva immergendo la callotta quando il tubo dava il suono più acuto.

Il tubo A da $0^{m},60$ presentava gli stessi fenomeni, ma in minor grado; gli altri tubi non li presentavano affatto; e ciò molto probabilmente avveniva, perchè essendo i detti tubi di minor diametro, contenevano minor massa di liquido e nel tempo stesso presentavano una maggiore rigidità. Premendo fortemente lungo le pareti dei detti tubi, e in qualunque regione, con pezzi di sughero o di legno incavati, non si ottenne alcuna modificazione nel suono, il che mostra la mancanza, o quasi, di vibrazioni trasversali.

Ho creduto opportuno descrivere questi esperimenti; imperocchè, se, per avventura, si volessero produrre dei suo-

ni coll' efflusso dei liquidi, si potrebbe esser tratti in errore da qualche suono dovuto unicamente alle pareti, e anche perchè fenomeni eguali potrebbero, almeno in parte, manifestarsi con qualche altro mezzo atto a provocare le vibrazioni dei liquidi.

V.

Esaminando l' andamento delle velocità calcolate mediante i suoni dati dai diversi tubi, si osserva che, in generale, la velocità maggiore corrisponde ai tubi di minor lunghezza e di minor diametro.

Ciò proviene, in parte, dall' essere i detti tubi più rigidi, come abbiamo detto più innanzi. Ma in parte proviene pure dal non essere i volumi dei detti tubi perfettamente simili. Infatti, avendo calcolato il volume interno dei tubi mediante il peso di acqua distillata che contenevano, alla temperatura di circa 4^0, e poscia calcolando il volume geometricamente, si ottennero i seguenti risultati:

	Volume teorico		Volume reale
Tubo A =	$1696^{cm^3},0$	. . . .	$1729^{cm^3},0$
» B =	981 ,0	. . . .	976 ,5
» C =	502 ,0	. . . .	498 ,0
» D =	211 ,9	. . . .	206 ,0
» E =	62 ,8	. . . .	61 ,0

Nel solo tubo A il volume reale supera quello teorico, negli altri è un po' minore: ma è evidente che la differenza di circa 6 cent. cubi, che si osserva nei tubi B e D fra il volume teorico e il volume reale, esercita una maggiore influenza nel 2.° tubo e quindi i suoni debbono risultare più acuti di quelli che si avrebbero se il volume del tubo D corrispondesse esattamente al volume teorico. Osserviamo pure, che tutte le volte che si sono ottenuti, con uno stesso

liquido, i suoni dei tubi C ad E, quelli del secondo tubo sono molto prossimi all'ottava acuta di quelli del primo, e ciò non avviene per i tubi A e D, a motivo delle differenze fra i volumi teorici e i volumi reali, le quali tendono ad abbassare i suoni del tubo A e inacutire quelli del tubo D. Fortunatamente le differenze si compensano in gran parte nelle medie, sicchè il valore finale ben poco differisce da quello, che si sarebbe ottenuto, se i tubi fossero stati costruiti perfettamente conformi ai volumi teorici.

VI.

Un'altra causa, che può sturbare il fenomeno, e della quale abbiamo discorso più volte, è la presenza di bolle di aria aderenti alle pareti, ovvero trascinate dall' afflusso del liquido, le quali bolle possono abbassare notabilmente il suono ed anche estinguerlo. È d'uopo usare grandi cure per espellerle, specialmente quando si esperimenta colle soluzioni saline e coi miscugli alcoolici, che sogliono sviluppare gran numero di minutissime bolle.

A proposito della influenza delle bolle d' aria, cade qui l' opportunità di ritornare sulla esperienza dell' André, il quale trovò, per la velocità del suono nell'acqua, un numero assai più piccolo di quello stesso trovato dal Wertheim senza la correzione risultante dal moltiplicare il risultato dell' esperienza per $\sqrt{\frac{3}{2}}$. L'André attribuì la notabile differenza unicamente alla flessibilità delle pareti; ma sembrami che in siffatto esperimento possa influire un'altra causa. In un lungo tubo che conduce dell'acqua, se anche totalmente pieno, è ben difficile che non rimangano bolle d' aria annidate fra i pezzi di congiunzione, ovvero trascinate dal liquido; il comprimersi di queste bolle deve esercitare una reazione assai più forte di quella che nasce

dalla flessibilità delle pareti, e da ciò deve risultare una considerevole diminuzione nella velocità del suono.

VII.

Esaminate le varie cause, che possono influenzare il fenomeno, poniamo ora a confronto i risultati da me ottenuti per i diversi liquidi, con quelli avuti dagli altri sperimentatori in condizioni, presso a poco, eguali tanto di densità, quanto di temperatura.

Per ciò che riguarda le soluzioni saline, porremo i numeri ottenuti colla formola $\frac{v \times l}{l_1}$; e dei valori del Wertheim, che già furono registrati nella 1.ª parte, sceglieremo quelli che corrispondono alle velocità del suono calcolata in un cilindro liquido, vale a dire non moltiplicata per $\sqrt{\frac{3}{2}}$.

Velocità dedotta dal suono				Velocità dedotta dalla compressibilità
Liquidi	Temperat.	Martini	Wertheim	
Acqua	3°.9 13 .7 25 .2	1398^m,6 1437 ,3 1457 ,2	 1173^m,4 a 15° 1250 ,0 » 30°	1425^m a 4°.1 (Grassi) 1457 a 13 .4 » 1491 a 25 0 »
Alcool	8°.4	1263^m,5	933^m,9 a 4°	1234^m a 7°.3 (Grassi)
Etere	0°	1145^m,3	946^m,3 a 0°	1112^m a 0° (Grassi) 1124 a 0° (Jamin, Amaury e Descamps)
Essenza di trementina	3°.5	1371^m,2	984^m,1 a 0°	1285^m a 0° (Colladon e Sturm) 1375^m a 3°.5 (Quincke)
Petrolio del Caucaso	7°.4	1395^m		1349^m a 7°.4 (Quincke) NB. Non è indicata la provenienza
Miscuglio alcoolico col 10,9 % di alcool	4°.4	1496^m		1545^m a 0° (Pagliani e Palazzo). Miscuglio contenente l' 11,98 % di alcool
Soluzione satura di cloruro sodico	14°.7	1660^m,6	1275^m,0 a 18°	1812^m,4 a 18°.1 (Grassi)
Soluzione satura di nitrato sodico	15°.3	1649^m,7	1363^m,5 a 20°.9	1690^m a 18°.1 (Grassi)
Soluzione satura di solfato sodico	14°.7	1528^m,0	1245^m,2 a 20°	
Soluzione satura di nitrato potassico	14°.4	1515^m,3		

Se ai numeri ottenuti dal Wertheim aggiungiamo la velocità del suono nell' acqua trovata dal Kundt, e fra i diversi valori scegliamo il più prossimo a quello dato dall' esperienza diretta, che è di 1382^m, scorgiamo che alcuno dei detti numeri si approssima a quelli dedotti dalla compressibilità quanto i nostri. E fermandoci in particolare sui risultamenti del Wertheim, notiamo che oltre le differenze assai forti fra le velocità ottenute con tubi di varia lunghezza, e che già furono da me indicate nella 1.ª parte del presente scritto, si riscontrano delle altre irregolarità che mostrano non essere il metodo, tenuto dal detto fisico, troppo opportuno non solo per determinare con precisione la velocità del suono, ma neppure per istudiarne l' andamento col variare le condizioni dell' esperienza.

E infatti nella tavola XI della Memoria citata (1) troviamo, ad esempio, che la velocità del suono nell'*alcool* a 4^0, dopo fatte le correzioni, è di $933^m,9$, la velocità dello stesso liquido a 23^0 è di 947^m. Per *l' essenza di trementina* si trova a $0^0,984^m,1$ e a 24^0, $989^m,8$. Parrebbe adunque che, per questi liquidi, la velocità del suono dovesse crescere colla temperatura; la qual cosa è contraria a tutte le esperienze piezometriche fatte da vari sperimentatori, ed è contraria pure ai miei risultamenti.

Il Wertheim spiega il fatto dicendo, che le differenze di temperatura, sotto cui aveva sperimentato, erano troppo piccole per dar luogo a delle variazioni sensibili nella velocità del suono. Eppure per l' acqua aveva trovato delle differenze non lievi, anche per temperature meno discoste delle indicate. L' alcool e l'essenza di trementina in ispecial modo, come appare dalle ricerche del Quincke, sono liquidi che sentono assai le variazioni di temperatura rispetto al loro grado di compressibilità, e nei nostri espe-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3.me série, t. 23, p. 472.

rimenti troviamo per l'alcool a $18^0.4$ una differenza di 38^m in meno, in confronto dell'alcool a $3^0.5$, vale a dire una differenza pressochè eguale a quella che si riscontra nelle velocità dedotte dalla compressibilità, le quali, secondo i dati di Jamin, Amaury e Descamps, danno, fra 0^0 e 14^0 la differenza di 44^m. Per l'essenza di trementina si ha, colle nostre esperienze, una differenza di 51^m fra le temperature di $3^0.5$ e 29^0. Aggiungiamo poscia che, nei numeri da noi ottenuti, eccetto l'acqua, col crescere della temperatura diminuisce l'altezza del suono, e ciò con tutti i tubi; invece nei numeri trovati dal Wertheim, coi quali formava le medie, per qualche tubo la velocità era maggiore a temperatura più alta, in qualche altro minore.

Siffatte sconcordanze confermano sempre più la grande influenza delle pareti, la quale non solo determina un abbassamento del suono, ma benanco lo fa meno puro; e lo stesso Wertheim confessa (1) di non esser certo del valore attribuito alla velocità del suono nell'etere, perchè appena appena poteva distinguerlo. Invece i suoni, ottenuti coll'efflusso, essendo tutti assai robusti e puri, rendevano assai più facile la determinazione del loro valore musicale, e il metodo di scotimento essendo diverso, si facevano assai meno sentire le reazioni dei moti vibratorî comunicati alle pareti; e perciò doveva risultare una concordanza assai maggiore colle velocità calcolate mediante la compressibilità.

Da tutto il complesso degli esperimenti dobbiamo concludere, che la ipotesi del Wertheim, cioè che i cilindri liquidi vibrino alla stessa guisa dei cilindri solidi, è inammissibile, e diremo col Daguin (2), che deve attribuirsi ad

(1) Memoria citata, p. 472

(2) *Traité de Physique*, 4me édit. Paris, Délagrane, 1878, t. 1, p. 703.

un caso fortuito se le velocità di alcuni liquidi, moltiplicate per $\sqrt{\frac{3}{2}}$, corrispondono con quelle dedotte dalla compressibilità.

VIII.

Al metodo da noi tenuto si potrebbe fare la seguente obiezione: per i liquidi più compressibili dell' acqua si trovano delle velocità un po' maggiori di quelle che risultano dalla formula; all' incontro le velocità sono più piccole per i liquidi meno compressibili. Parrebbe adunque che si dovessero adattare le dimensioni dei tubi alla quantità del liquido, nello stesso modo che una cassa di risonanza piena d' aria, che rinforza il suono di un diapason, lo rinforza assai meno se la si riempie di anidride carbonica o di idrogeno; e converrebbe cambiare le dimensioni della cassa per ottenere un rinforzo completo.

Siffatta obiezione sarebbe vera qualora il rubinetto, che regola l' afflusso, si trovasse aperto nello stesso modo durante l' affluire dell' uno o dell' altro liquido; ma siccome per provocare il suono più intenso e più puro conviene, per ciascun liquido, variare l' apertura del rubinetto, risulta, che la periodicità dell'efflusso cambia da un liquido all' altro, dovendo essa esser tale da indurre il moto vibratorio in tutto il sistema sonoro. Se dunque troviamo in qualche caso una velocità maggiore di quella data dalla formula, ciò deve attribuirsi alla impurità del liquido; e sono certo che, se avessi avuto a mia disposizione un distillatore capace di darmi l' alcool veramente assoluto, avrei trovato anche per questo liquido una velocità un po' minore, come è avvenuto per l' acqua, per l' essenza di trementina e per le soluzioni saline.

IX.

Venendo ora a dedurre il coefficiente di compressibilità col sostituire nella formula

$$c = \frac{0{,}76 \times \Delta \times g}{d \times v.^2}$$

i valori di v da noi trovati per i diversi liquidi, abbiamo i seguenti risultamenti:

Liquidi	Temperatura	Coefficiente di compressibilità dedotto dalla velocità del suono	Coefficiente di compressibilità misurato col piezometro
		milionesimi	
Acqua	3°.9	50,7	49,9 a 4°.1 Grassi
	13 .7	49,0	47,7 a 13 .4 »
	25 .2	47,8	45,6 a 25 .0 »
Alcool	8°.4	79,0	82,8 a 7°.3 Grassi
Etere	0°	105,0	111 a 0° Grassi 109 » Jamin, Amaury e Descamps 115 a 0° Quincke
Essenza di trementina	3°.5	61,3	58,2 a 0° Quincke
Petrolio del Caucaso	7°.4	62,8	64,9 a 0° Quincke Non è indicata la provenienza
Soluzione satura di cloruro sodico	4°.4	31,4	25,7 a 18°.1 Grassi
	14 .7	30,4	
Soluzione satura di nitrato sodico	3°.2	28,7	29,5 a 18°.1 Grasssi
	15 .3	27,3	
Soluzione satura di solfato sodico idrato	4°.1	44,8	
	14 .7	40,4	
Soluzione satura di nitrato potassico	4°.3	43,5	
	14 .4	39,6	

Dal precedente prospetto apparisce, che le compressi-

bilità, calcolate mediante la velocità del suono, risultano assai prossime a quelle dedotte col piezometro.

Egli è certo che, se si volesse determinare unicamente la compressibilità di un liquido, l'uso del piezometro condurrebbe a dei risultamenti più precisi, perchè, potendo operare su piccole porzioni di liquido, si sarebbe nel caso di poterlo avere purissimo. Nulladimeno anche i numeri, ottenuti col piezometro da sperimentatori diversi, offrono delle differenze di 2, 3, 4, e anche più milionesimi, come appare dai numeri, che abbiamo scelti per confrontare coi nostri, e dai molti altri che si possono leggere nelle Memorie citate.

Siffatta concordanza, ottenuta con due metodi così diversi di esperimento, l'uno dei quali indipendente da una ipotesi combattuta dalla plurità dei fisici, qual'è quella del Wertheim, mostra che può applicarsi con profitto il sistema da noi tenuto per misurare la velocità del suono nei liquidi, la quale, conosciuta, dà il mezzo di calcolare la compressibilità. Fra i due modi da noi adoperati per misurare la velocità del suono, cioè di dedurla dalla lunghezza dell'onda sonora, ovvero mediante il rapporto fra la velocità nota dell'acqua e quella incognita di un altro liquido, crediamo il secondo più esatto per le seguenti ragioni: 1.° Perchè i tubi di vetro sono meno flessibili di quelli metallici; 2.° perchè col rapporto viene ad essere diminuita quella influenza pressochè eguale, dovuta alle pareti, che ha per effetto di abbassare il suono; 3.° perchè i tubi di vetro possono essere puliti assai meglio di quelli metallici, e la loro trasparenza permette di scorgere la più piccola bolla d'aria.

Ma, affine di poter sperimentare con profitto mercè il detto sistema, conviene usarlo sotto temperature poco discoste dagli 8 gradi, perchè appunto a siffatta temperatura venne eseguita, per l'acqua, la misura diretta che noi prendiamo come termine di confronto. E siccome le condizioni

dell'esperienza potrebbero essere diverse, così sarebbe opportuno di misurare direttamente la velocità del suono nel l'acqua sotto temperature superiori e inferiori agli 8 gradi, affine di avere un maggior numero di termini di confronto per le misure indirette che, per avventura, si volessero fare sopra gli altri liquidi.

I limitati mezzi, di cui potei disporre, non mi permisero di estendere le ricerche a molti altri liquidi. Mio intendimento sarebbe stato di sperimentare sugli acidi e sulle soluzioni acide più o meno concentrate; ma per simiglianti esperienze avrebbe occorso, che tutte le parti dello apparecchio fossero state in platino, non solo in vista della corrosione del rame o dell' ottone, ma benanco perchè l'azione chimica avrebbe alterato il liquido, e dato luogo a sviluppo di bolle gassose, che avrebbero profondamente alterato i suoni, come abbiam detto più volte.

Nulladimeno, la serie non piccola di liquidi sui quali abbiamo sperimentato, e i risultati soddisfacenti ottenuti, mostrano che i fatti fisici non sono mai isolati, e che taluno, che appare a prima vista oggetto di sola curiosità, può, una volta o l' altra, essere utile di applicazioni, come appunto è avvenuto delle esperienze di Felice Savart sui suoni prodotti dall' efflusso dei liquidi.

X.

I principali risultamenti da noi ottenuti possono riassumersi nelle seguenti conclusioni:

1.° I liquidi che danno suoni, sia per afflusso che per efflusso, si comportano allo stesso modo dei gas, perchè i risultati concordano con quelli del Masson, come già fu dimostrato nelle mie precedenti Memorie.

2.° I varî esperimenti fatti sulle pareti dei tubi, e il cambiamento della velocità del suono, che ha luogo quando

le pareti sono molto sottili, dimostra che la flessibilità delle pareti è la causa dei suoni più gravi ottenuti dal Vertheim, e che perciò è inammissibile la ipotesi che un cilindro liquido vibri alla stessa guisa di un cilindro solido.

3.° La velocità del suono nell'acqua cresce colla temperatura, almeno dentro i limiti delle temperature ordinarie.

4.° La velocità del suono negli altri liquidi scema col crescere della temperatura.

5.° Se nell'acqua si disciolgono delle sostanze gassose, liquide (dentro certi limiti) e solide, avviene un accrescimento nella velocità del suono.

6.° Ciò che accade nell' acqua avviene pure negli altri liquidi; così vediamo crescere la velocità del suono nell' alcool che si unisce all' acqua assorbita dall' atmosfera quando si prolunga l'esperimento; e vediamo pur crescere la velocità del suono nella essenza di trementina, se tiene in soluzione maggior copia di sostanze resinose.

7.° Nelle soluzioni saline, la velocità del suono cresce coll' aumentare la quantità di sale disciolto.

8.° Varie soluzioni saline, portate allo stesso grado di densità, danno numeri diversi per la velocità del suono.

9.° Sciogliendo uno stesso peso di sale in una stessa quantità di acqua, si ottengono delle velocità sensibilmente diverse, da sale a sale, se i sali sono anidri; molto più forti, se i sali contengono acqua di combinazione.

10.° Sciogliendo nell' acqua uno stesso peso di un sale anidro e di un sale idrato, troviamo che la velocità del suono, nella soluzione col sale anidro, è maggiore della velocità del suono nella soluzione fatta col sale idrato.

Venezia, 31 marzo 1885.

3 0112 072846642